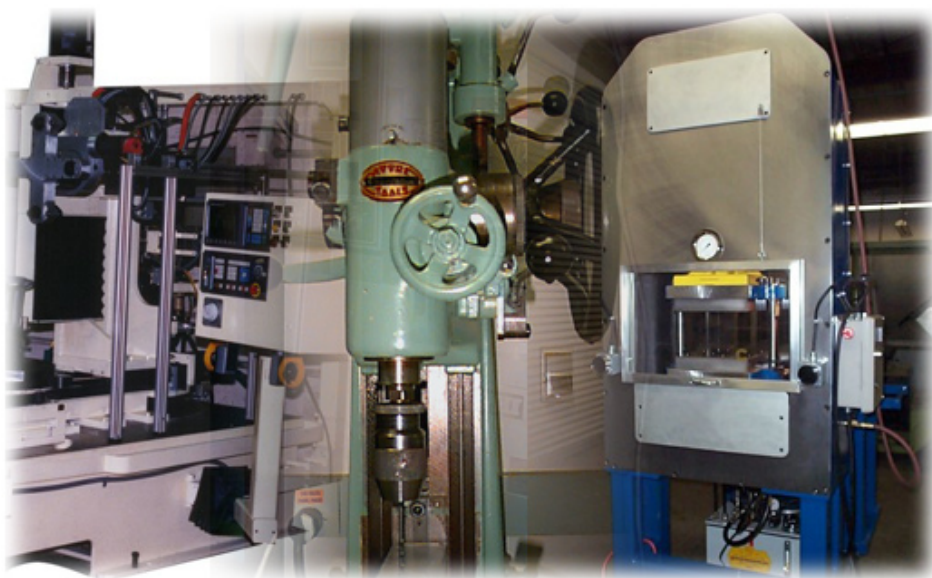


ميكانيكا إنتاج

اختبار المواد

١٢٣ ميك



الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد :

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي: لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " إختبار المواد " لمتدربي قسم " ميكانيكا إنتاج " للكتليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه: إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

يعتبر علم اختبار المواد من العلوم الأساسية المطلوب معرفتها للعاملين في حقل التقنية الميكانيكية. وقبل أن نبدأ بالحديث عن هذا العلم يستحسن ذكر تعريف لما يقصد باختبار المواد.

هناك عدة تعاريف متقاربة يمكن الجمع بينها بهذا التعريف وهو : أن اختبار المواد يهتم بدراسة العمليات المختلفة (المتلفة وغير المتلفة) التي تجرى على المواد الهندسية بغرض جمع معلومات وبيانات عن الخواص الميكانيكية لهذه المواد.

من هذا التعريف يتبين لنا أن الهدف هو الحصول على الخواص الميكانيكية للمادة والتي يمكن أن تعرف بأنها تلك الخواص المرتبطة بتصرفات المواد الهندسية (مرنة وغير مرنة) عند تعرضها لقوى خارجية وهذه الخواص تشمل : مقاومة الشد، إجهاد الخضوع، الصلادة، الصلابة، المطولية وغيرها . إن معرفة الخواص الميكانيكية يعتبر مهماً لعدة أسباب منها :

- ١ - معرفة مدى مطابقة المنتجات للمواصفات المحددة (التحقق من مطابقة المواصفات).
- ٢ - وضع معايير للتصميم (أقصى مقاومة للحمل).
- ٣ - تقييم العمليات التي تجرى على المواد الهندسية (مثل المعالجات الحرارية).

يمكن تقسيم المواد الهندسية إلى ما يلي:

أ (مواد معدنية Metallic Materials وتنقسم إلى :

١ - معادن حديدية Ferrous Metals

مثل الحديد المطاوع (Wrought Iron) والصلب (Steel) وحديد الزهر (Cast Iron).

٢ - معادن غير حديدية Non Ferrous Metals ، وتنقسم إلى :

أ (معادن ثقيلة Heavy Metals

مثل النحاس Copper والنيكل Nickel

ب (معادن خفيفة Light metals

مثل الألمنيوم Aluminium والمغنيسيوم Magnisium

ج (معادن طرية Soft Metals

مثل الرصاص Lead والقصدير Tin.

ب (مواد غير معدنية Non metallic materials وتنقسم إلى :

١ - مواد بناء construction metals

مثل الاسمنت والجبس والأخشاب والطوب .

٢ - مواد أخرى : مثل البلاستيك والمطاط والفلين.

الوحدات الهندسية Units:

عندما يتم التعامل مع الحساب الهندسي فإنه من الضروري الاهتمام بالوحدات الهندسية. فمثلاً حين نقول أن درجة الحرارة الخارجية هي ٨٠ أو أن طول الغرفة هو ١٥ ثم نسكت فإن كلاماً كهذا لا يعد كاملاً، ولكن حين نقول أن درجة الحرارة هي ٨٠ فهرنهايت وطول الغرفة ١٥ قدماً فحينها يكون الكلام هندسياً تاماً وذا معنى.

ولأن القيم الهندسية والفيزيائية مرتبطة ببعضها بالقوانين وبأصل تعريفها لذلك فإن عددا قليلا منها (نسبياً) سيكون كافياً لاحتواء وقياس الباقي كله وهذا ما يسمى بالأبعاد الأساسية (Primary Dimension) أما باقي القيم التي تحسب باستخدام الأبعاد الأساسية فتسمى الأبعاد الثانوية (Secondary Dimension).

أ (الأبعاد الأساسية ووحداتها):

البعد Dimension	الرمز Symbol	الوحدة SI Unit	الوحدة (البريطانية) British Unit
الكتلة Mass	M	Kg	Ibm
الطول Length	L	M	Ft
الزمن Time	t.	Sec	Sec
درجة الحرارة Temperature	T	K , C	F

ب) الأبعاد الثانوية ووحداتها :

كما ذكر سابقاً فإن الأبعاد الثانوية تعتمد في وحداتها على وحدات الأبعاد الأساسية وسنذكر في الجدول التالي مثلاً لذلك :

البعد Dimension	الرمز Symbol	الوحدة SI Unit
القوة	F	$N = (kg \cdot m / Sec^2)$
السرعة	V	m/sec
الضغط	P	$Pa = (N / m^2)$
المساحة	A	m^2

توزيع الحقيبة :

يمكن تقسيم الاختبارات التي تجرى إلى قسمين رئيسين :

أولاً: الاختبارات المتلفة : يحدث في هذا النوع من الاختبارات إتلاف للمادة التي يتم اختبارها بحيث لا يمكن استخدامها مرة أخرى. وهي الاختبارات التي سيتم تناولها من الوحدة الأولى إلى الوحدة الرابعة.

ثانياً: الاختبارات غير المتلفة : لا يحدث في هذا النوع من الاختبارات إتلاف للمادة المختبرة ولذلك يمكن استخدام هذه المادة بعد الانتهاء من الاختبار. وهي الاختبارات التي سيتم تناولها في الوحدة الخامسة.

بناء على ما تقدم فإن تقسيمنا للحقيبة التي بين يديك سيكون كالتالي :

١ - تمهيد: تم الحديث فيه عن مقدمة عامة لعلم اختبار المواد.

٢ - الوحدة الأولى: اختبار الشد Tensile Test

٣ - الوحدة الثانية: اختبار الضغط Compression Test

٤ - الوحدة الثالثة: اختبار الصدم Impact Test

٥ - الوحدة الرابعة: اختبار الصلادة Hardness Tests

٦ - الوحدة الخامسة: الاختبارات غير الإتلافية وتشمل:

١) اختبار الأشعة السينية X-Ray Test

٢) اختبار الموجات فوق الصوتية Ultrasonic Test

٣) الاختبارات المغناطيسية Magnetic Test

٤) اختبارات أخرى.



المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

اختبار المواد

اختبار الشد

اختبار الشد

المحتوى:

اختبار الشد وبعض الخصائص الميكانيكية

الأهداف:

- ١ - معرفة اختبار الشد و منحني الإجهاد والانفعال
- ٢ - معرفة أنواع الإجهاد والانفعال وعلاقاتها
- ٣ - معرفة وحساب بعض الخصائص الميكانيكية مثل إجهاد الخضوع - معامل المرونة - حد المرونة - أقصى إجهاد - حد الكسر - الممتدولية - الرجوعية - المتانة
- ٤ - معرفة تأثير درجة الحرارة على اختبار الشد

الوقت المتوقع للتدريب:

ثمان ساعات

الوسائل المساعدة:

ماكينة الاختبار العامة لإجراء اختبار الشد

مقدمة

يعتبر اختبار الشد من أكثر الاختبارات الإتلافية شيوعاً نظراً لسهولة إجراء الاختبار ولكمية الخواص الميكانيكية المستنتجة من هذا الاختبار . يتم هذا الاختبار عن طريق شد العينة المراد اختبارها بعد تثبيتها من طرفيها محورياً بشكل تدريجي من الصفر حتى الكسر . تستند معظم المواصفات القياسية إلى اختبار الشد لبيان الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية مثل : حد التناوب (Proportional Limit) ، إجهاد الخضوع (Yield stress) أقصى مقاومة إجهاد (Ultimate tensile stress) وغيرها مما سيأتي الحديث عنه لاحقاً في هذه الوحدة .

الإجهاد والانفعال : Stress & strain

أ (الإجهاد : يعرف الإجهاد بأنه حاصل قسمة القوى العمودية على وحدة المساحة ولذلك فإن وحدة الإجهاد هي باسكال (Pa) أو (N/m^2) وهو ينقسم إلى قسمين :

١ - الإجهاد الهندسي Engineering stress (σ)

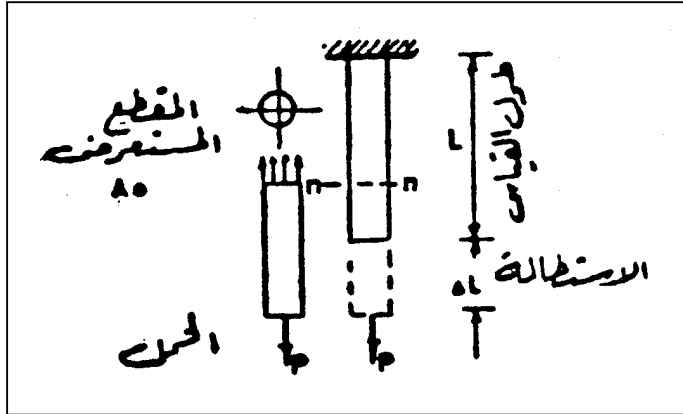
هو حاصل قسمة القوة "F" على المساحة المقطعية الأصلية "A₀" أي المساحة المحسوبة قبل الشد .

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad 1.1$$

٢ - إجهاد حقيقي True stress (σ_{Tr})

وهو حاصل قسمة القوة "F" على مساحة المقطع اللحظية للعينة (A_i) أي المساحة المحسوبة لحظة قراءة القوة . "لاحظ أن المساحة تقل مع الشد" .

$$\sigma_{Tr} = \frac{F}{A_i} \quad 1.2$$



شكل ١,١ : التحميل بالشد

ب (الانفعال Strain :

يعرف الانفعال بأنه ما يحدث للمادة من تغير داخلي نتيجة تأثير الإجهاد عليها . وينقسم كذلك إلى قسمين :

١ - الانفعال الهندسي Engineering Strain (e) :

وهو حاصل قسمة الاستطالة (ΔL) الحاصلة للعينة من جراء الشد على الطول الأصلي للعينة (L_0). لذلك فإن وحدة الانفعال هي (m/m) أو يمكن أن نقول بأنه لا وحدة له Dimensionless

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 1.3$$

٢ - الانفعال الحقيقي True Strain (ϵ) :

هو اللوغاريتم الطبيعي لقسمة الطول النهائي على الطول الأصلي.

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right) \quad 1.4$$

ج (معامل يونغ Young's Modulus (E) :

معامل يونغ هو ما يربط العلاقة بين الإجهاد والانفعال الهندسيين في الشد قبل الوصول إلى حد التناسب. وله وحدة باسكال Pa.

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad 1.5$$

علاقة الإجهاد والانفعال

مما سبق تبين لنا أن تعريف الانفعال الهندسي هو:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 1.6$$

حيث إن الاستطالة (ΔL) هي حاصل طرح الطول الأصلي من الطول النهائي.

$$\Delta L = L_f - L_0 \quad 1.7$$

من المعادلة السابقة نستنتج أن :

$$e = \frac{L_f}{L_0} - 1 \quad 1.8$$

أو

$$\frac{L_f}{L_0} = e + 1 \quad 1.9$$

من المعلوم في المعادلة رقم (١,٤) أن : $\varepsilon = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right)$

لذلك فمن الممكن إيجاد المعادلة التالية لحساب الانفعال الحقيقي بمعلومية الانفعال الهندسي كما يلي :

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad 1.10$$

كذلك بالنسبة للإجهاد الحقيقي (σ_{Tr}) فإنه عرف كما في المعادلة رقم (١,٢) بأنه :

$$\sigma_{Tr} = \frac{F}{A_i}$$

باتباع الخطوات التالية ، فإنه من الممكن استنتاج علاقة جديدة لحساب الإجهاد الحقيقي بمعرفة الإجهاد الهندسي في منطقة التشوه المتجانس:

$$\sigma_{Tr} = \frac{F}{A_i} \times \frac{A_0}{A_0} \quad 1.11$$

$$\sigma_{Tr} = \sigma \times \frac{A_0}{A_i} \quad 1.12$$

بما أن حجم العينة ثابت، فإن الحجم الأصلي (قبل الشد) يساوي الحجم النهائي وذلك في منطقة التشوه المتجانس Homogenous deformation أي قبل حدوث العنق:

$$V_0 = V_f \quad 1.13$$

حجم الأسطوانة هو حاصل ضرب مساحة المقطع في الطول :

$$A_0 L_0 = A_f L_f \quad 1.14$$

أو

$$\frac{A_0}{A_f} = \frac{L_f}{L_0} \quad 1.15$$

من المعادلتين ١,١٢ و ١,١٥ نستطيع كتابة المعادلة التالية:

$$\sigma_{Tr} = \sigma \left(\frac{L_f}{L_0} \right) \quad 1.16$$

وبالتعويض في المعادلة ١,٩ نحصل على

$$\sigma_{Tr} = \sigma(e + 1) \quad 1.17$$

مثال : عينة طولها الأصلي ١٠٠ مم تم إجراء اختبار الشد عليها حتى أصبح طولها ١٠٢ مم. أوجد كلا من:

أ) الانفعال الهندسي

ب) الانفعال الحقيقي .

الحل :

$$L_0 = 100mm \quad L_f = 102mm$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{102 - 100}{100} = 0.02 \quad (أ)$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{102}{100}\right) = 0.0198 \quad (ب)$$

أو بالتعويض في المعادلة ١,١٧

$$\varepsilon = \ln(e + 1) = \ln(0.02 + 1) = 0.0198$$

سلوك المعادن تحت تأثير حمل الشد الاستاتيكي المحوري

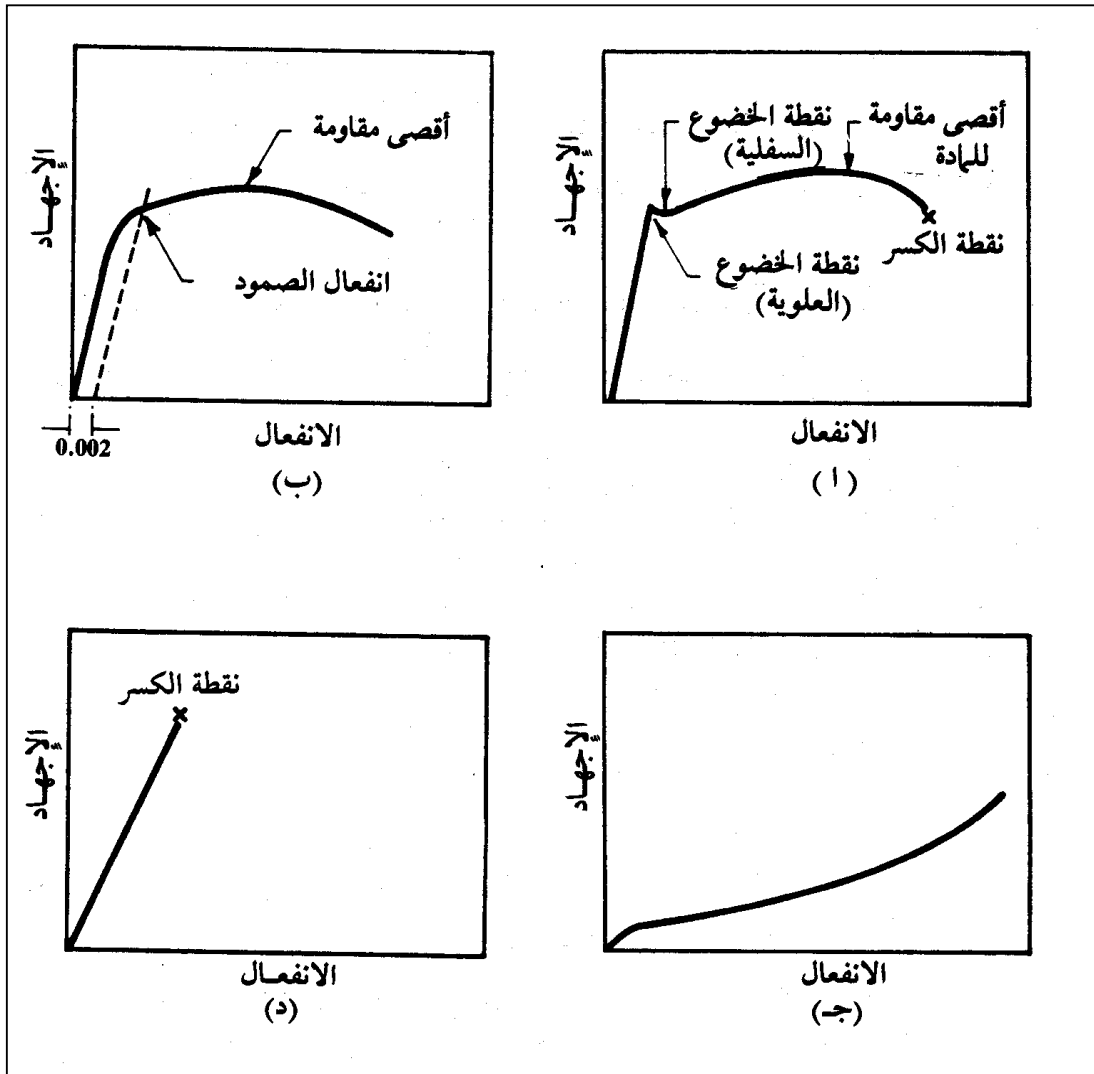
تختلف المعادن في سلوكها تحت تأثير حمل الشد الاستاتيكي المحوري تبعا لطبيعة تلك المواد فمنها ما يكون:

أ - معادن مطيلة (Ductile Metals) : وهي المعادن التي يمتاز منحني الإجهاد والانفعال لها بوجود منطقة مرونة (Elastic Zone) ومنطقة لدونة (Plastic Zone) ومنطقة بين المنطقتين هي ما تسمى بمنطقة الخضوع (Yield Zone) ، كما تمتاز بحصول تشوه كبير لها قبل حدوث الكسر وكذلك تمتاز بتكون الرقبة أو العنق (Neck).

ب - معادن نصف مطيلة (Semi Ductile Metals) : وهي المعادن التي يمتاز منحني الإجهاد والانفعال لها بوجود منطقة مرونة ومنطقة لدونة ولكن دون وجود منطقة الخضوع مميزة بين المنطقتين، كما يحدث لها تشوه متوسط وكذلك تمتاز بتكون رقبة أقل وضوحا.

ج - معادن قصيفة (Brittle Metals) : هي التي لا يوجد لها منطقة خضوع ولا يوجد لها علاقة تناسب بين الإجهاد والانفعال فالمنحني منذ بدايته عبارة عن خط مائل وليس خطا مستقيما ويحدث بها تشوه صغير جدا مقارنة بالمواد الأخرى كما لا يتكون فيها رقبة، إذ أن المعادن القصيفة لا تتحمل قوى الشد لكنها في المقابل تتحمل قوى الضغط بشكل أكبر.

كما يوجد بعض المواد تكون عالية اللدونة (Super Plastic) يزيد فيها الانفعال المرن عن نسبة ١٠٠٪ مثل المطاط وبعض المواد البلاستيكية كما هو واضح في الشكل ١،٢.



شكل ١,٢ : منحنيات الإجهاد والانفعال لمواد مختلفة ١ - مادة مطيلية

ب - مادة نصف مطيلة ج - مادة عالية المرونة مثل البلاستيك د - مادة قصفة.

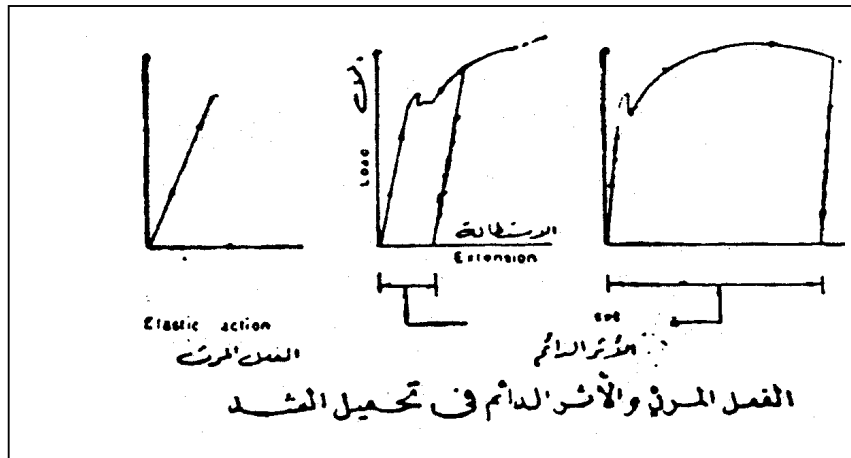
منحنى الإجهاد والانفعال

القراءات المستنتجة من اختبار الشد ترسم بعد ذلك في منحنى يسمى منحنى الإجهاد والانفعال.

شكل منحنى الإجهاد والانفعال سوف يعتمد بشكل كبير على:

- ١ - العينة المختبرة (المادة المجرى عليها الاختبار).
- ٢ - المعالجات الحرارية التي حصلت لها.
- ٣ - درجة الحرارة أثناء الاختبار.

عند شد العينة في منطقة المرونة ثم رفع الحمل عنها ستعود العينة إلى وضعها الأصلي وهذا ما يسمى بالتشوه المرن. كما هو واضح في الشكل ١,٣.



شكل ١,٣: منطقة المرونة هي عبارة عن الخط المستقيم

لاحظ أنه في المعادن والسيراميك تكون علاقة الإجهاد والانفعال في منطقة المرونة متناسبة (خط مستقيم) وهي تتبع قانون معامل يونغ Young Modulus كما في المعادلة ١,٥، وفي أنظمة أخرى (مثل اللدائن) الإجهاد لا يتناسب خطياً مع الانفعال (العلاقة لا تمثل خط مستقيم) في منطقة المرونة. مع زيادة الإجهاد تتجاوز المادة حد المرونة ويحصل لها تشوه لدن (سوف لن تعود إلى وضعها الأصلي بعد زوال الحمل) مع زيادة في الطول (الاستطالة) ونقصان في مساحة المقطع (حجم العينة لا يتغير). تتم هذه العملية حتى تصل إلى نقطة عدم الاتزان عندها تتكون الرقبة (Neck) والتي تكون عندها مساحة المقطع للعينة أقل ما يمكن وبعدها يحصل الكسر للعينة في هذه النقطة. منحنى الإجهاد والانفعال لأي مادة يعطينا معلومات قيمة عن هذه المادة وعن إمكانية استخدامها لتطبيق هندسي معين. شكل ١,٤ يبين منحنى إجهاد وانفعال مثالي لمادة معدنية مطيلة.

دعنا نختبر هذا المنحنى مع بعضنا لتتعرف على بعض المعلومات المهمة والتي يمكن استخراجها من هذا الشكل.

١ - حد التناسب (Proportional Limit): هو أقصى قيمة للإجهاد والتي عندها تكون علاقة الإجهاد بالانفعال علاقة خطية (خط مستقيم) تحصل هذه عند النقطة (A) كما في الشكل.

٢ - حد المرونة (Elastic Limit): وهو أقصى إجهاد مطبق على المادة بحيث لا يحصل هناك تشوه دائم عند زوال الحمل. النقطة (B) كما في الشكل.

٣ - إجهاد الخضوع (Yield strength): هي النقطة التي يتم عندها التحول من الانفعال المرن إلى الانفعال اللدن وفي واقع الأمر هي ليست نقطة بل منطقة تمثل آخر مراحل مقاومة المادة للتشوه اللدن، كما يمكن تعريفه بأنه الإجهاد الذي يحدث عنده زيادة ملحوظة في الاستطالة دون زيادة في الحمل (أي أن الانفعال يزداد بدون زيادة الإجهاد). النقطة (C) كما في الشكل.

وهو إجهادان إجهاد خضوع أعلى وهو لا يعد خاصية من خصائص المعدن إذ أنه يعتمد على ظروف الاختبار كسرعة التحميل، وإجهاد خضوع أدنى وهو الذي يعتبر خاصية من الخصائص الميكانيكية للمعدن إذ أن قيمته ثابتة لا تتغير لكل معدن.

٤ - إجهاد الضمان (Proof Stress): توجد بعض المعادن التي لها خاصية المرونة ولكن ليس لها منطقة خضوع، ونظراً لأن لها خاصية المرونة لذلك يلزم الحصول على إجهاد ليعبر عن مقاومة المعدن في حد المرونة ويسمى هذا الإجهاد بإجهاد الضمان. (أي أن إجهاد الضمان هو المقاومة في حد المرونة للمعادن التي لها خاصية المرونة وليس لها منطقة خضوع).

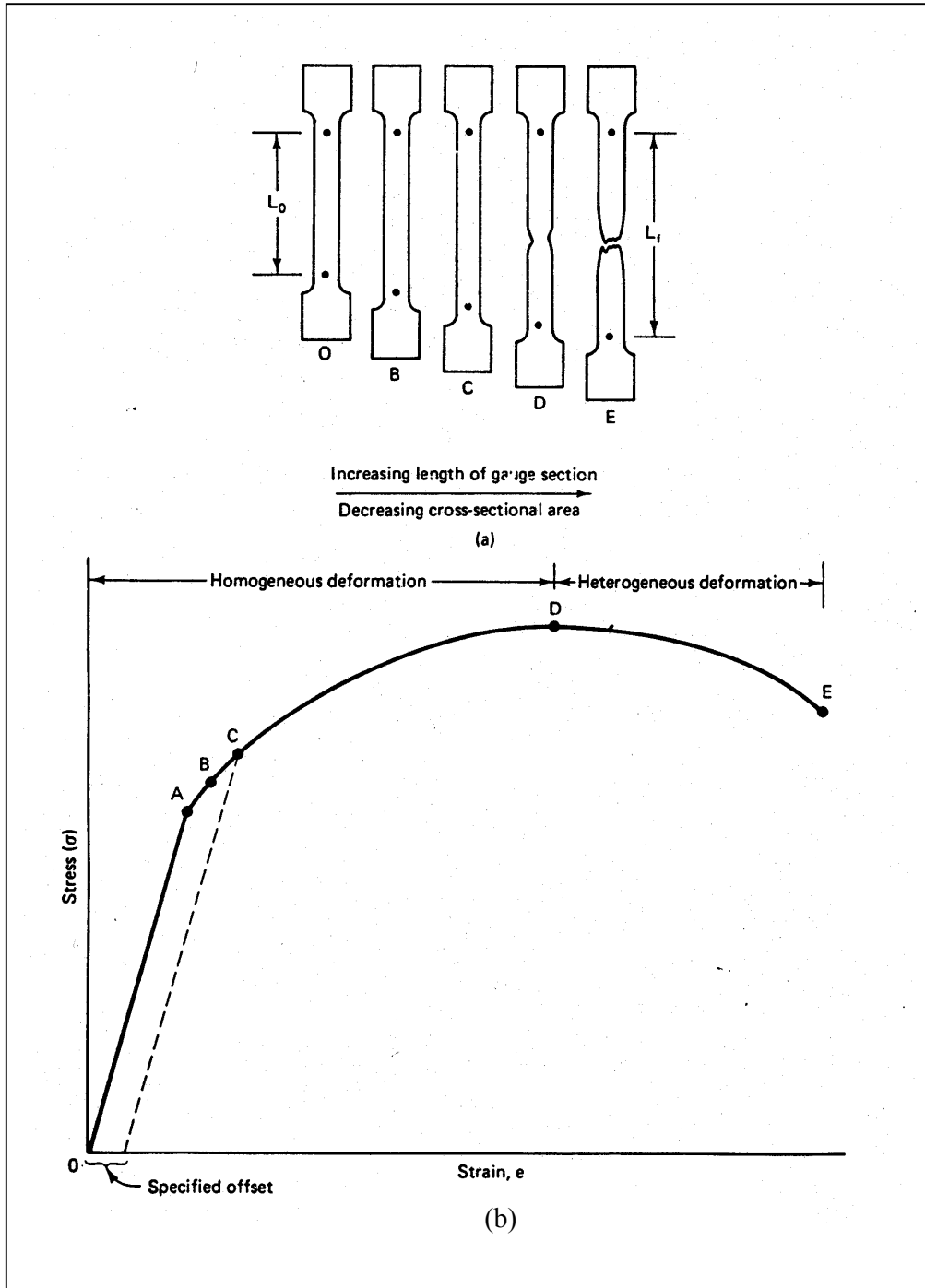
ويعرف إجهاد الضمان بأنه الإجهاد الذي يحدث في قطعة الاختبار أثناء تحميلها استطالة لا تناسبية مساوية لنسبة مئوية محددة من طول القياس.

لذلك يراعى عند ذكر إجهاد الضمان ضرورة تحديد قيمته ببيان تلك النسبة المئوية من طول القياس، وغالباً تتراوح قيمة الاستطالة اللاتناسبية التي تستخدم لتعيين إجهاد الضمان بين ٠,١٪ و ٠,٥٪ من طول القياس.

إجهاد الضمان = حمل الضمان / مساحة المقطع الأصلي

ولتحديد إجهاد الضمان على الرسم يتم تحديد الاستطالة اللاتناسبية المعطاة على محور الانفعال

ثم رسم خط مستقيم موازٍ لخط التناسب يتقاطع هذا الخط المستقيم مع منحنى الإجهاد والانفعال في نقطة معينة فيكون الإجهاد المقابل لتلك النقطة هو إجهاد الضمان المطلوب كما هو واضح من الشكل



شكل ١,٤ : (a) شكل عينة مطولية تحت الشد عند فترات مختلفة من الشد

(b) منحنى إجهاد وانفعال مثالي لمادة مطيلية.

A - حد التناسب B - حد المرونة C - إجهاد الخضوع

D - أقصى إجهاد شد E - نقطة الكسر

٥ - أقصى إجهاد للشد (Ultimate Tensile Stress): هو القيمة المقاسة لأقصى حمل تستطيع المادة تحمله محورياً. يمكن حسابها بأخذ قيمة أقصى حمل خلال اختبار الشد وقسمته على مساحة المقطع الأصلية (النقطة D في الشكل ١,٤) .

$$\sigma_{UTS} = \frac{F_{Max}}{A_0} \quad ١,١٨$$

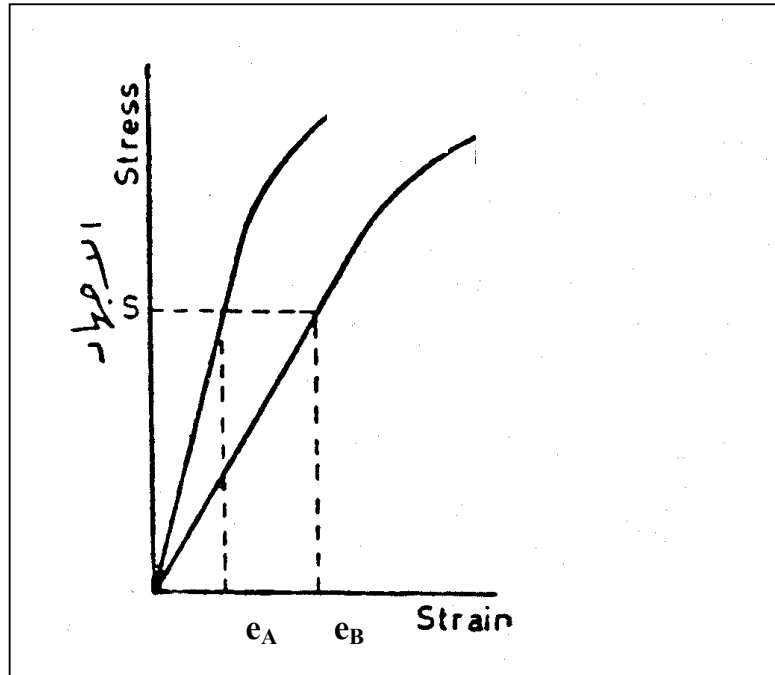
مع ملاحظة أن هذا الإجهاد لا يستخدم عادة في حسابات التصميم وذلك لأن العينة قبل هذه النقطة قد حصل لها تشوه دائم. إضافة إلى ذلك فبعد الوصول إلى هذه النقطة فإن العينة سوف تتشوه تشوهاً دائماً باستخدام إجهاد أقل من الإجهاد الأقصى.

٦ - إجهاد الكسر: هو الإجهاد الذي يحصل عنده كسر للعينة (النقطة E في الرسم)

٥ - معامل يونغ (Young's Modulus): معامل يونغ أو ما يطلق عليها معامل المرونة يمكن حسابه باستخدام الرسم وذلك عن طريق حساب الميل في الجزء الأول من المنحنى والذي يكون فيه خط مستقيم (في منطقة المرونة) كما في المعادلة رقم ١,٥ .

$$E = \frac{\sigma}{e}$$

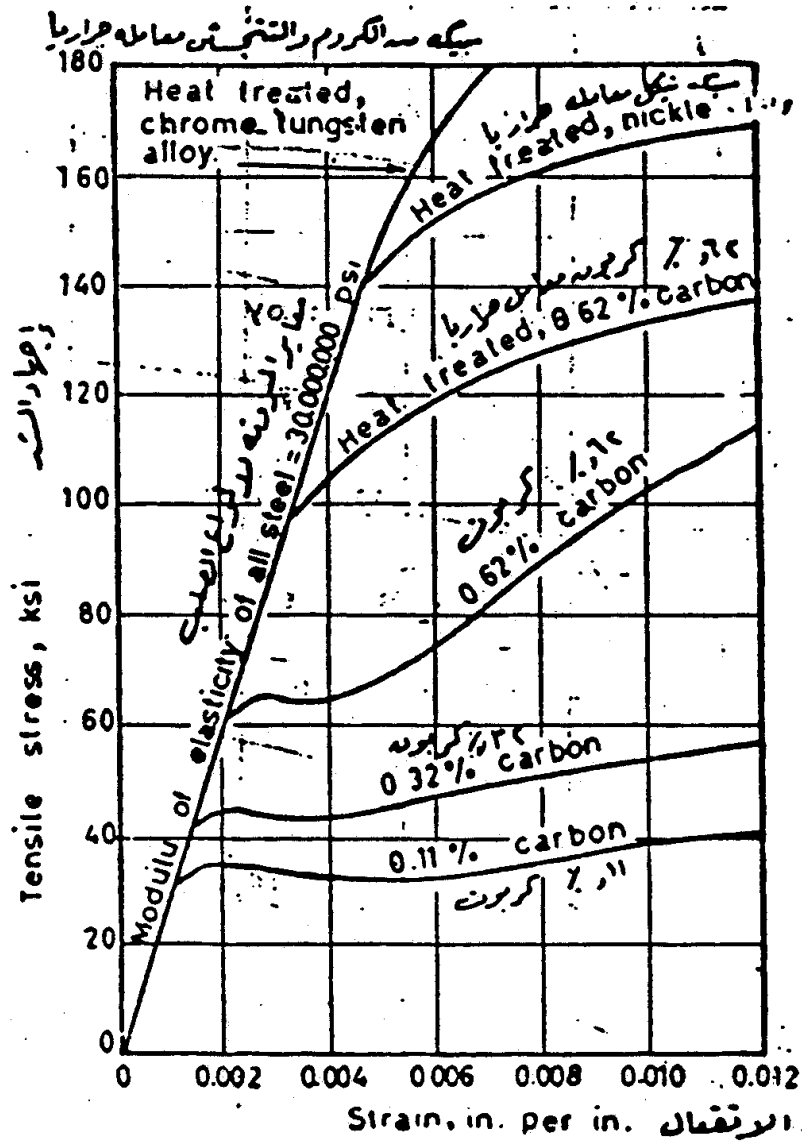
ويعد معامل يونغ مقياس لصلابة المادة في حدود المرونة والصلابة (Stiffness) هي مقاومة المادة للتشكل تحت تأثير الأحمال (أي مقاومة المادة للاستطالة تحت تأثير حمل الشد). فكلما زادت قيمة معامل يونغ كلما قلت قيمة الانفعال المرن لأي قيمة إجهاد مرنة (أي كلما زادت صلابة المادة) كما في الشكل ١,٥ وهناك عدة تطبيقات إنشائية (مثل أجنحة الطائرات) ما يحكم عملية التصميم فيها ليس قوة المادة فقط بل كذلك الصلابة (Stiffness).



شكل ١,٥ : شكل يوضح صلابة المواد باختلاف معامل يونغ لها

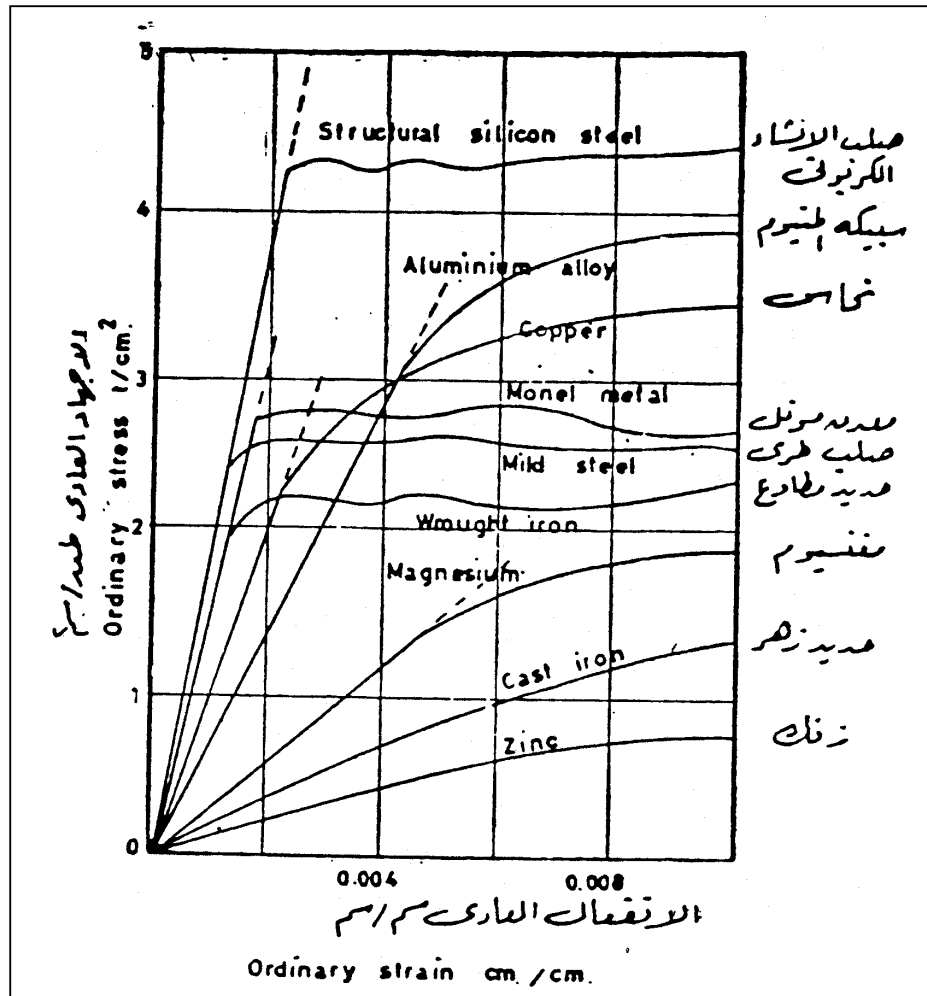
الشكل رقم ١,٦ يبين أن ميل منحنى الإجهاد والانفعال في منطقة المرونة (أي معامل يونغ) قيمة واحدة لأنواع الصلب المختلفة في نسبة الكربون وفي المعاملة الحرارية أي أن صلابة أنواع الصلب يمكن اعتبارها واحدة بقيمة تساوي تقريباً ٢١٠٠ طن/سم^٢.

في حين أن معامل يونغ يختلف باختلاف المواد حيث أنه لكل مادة معامل يونغ الخاص بها كما يتضح ذلك من الشكل ١,٧



STRESS-STRAIN DIAGRAMS FOR VARIOUS STEELS

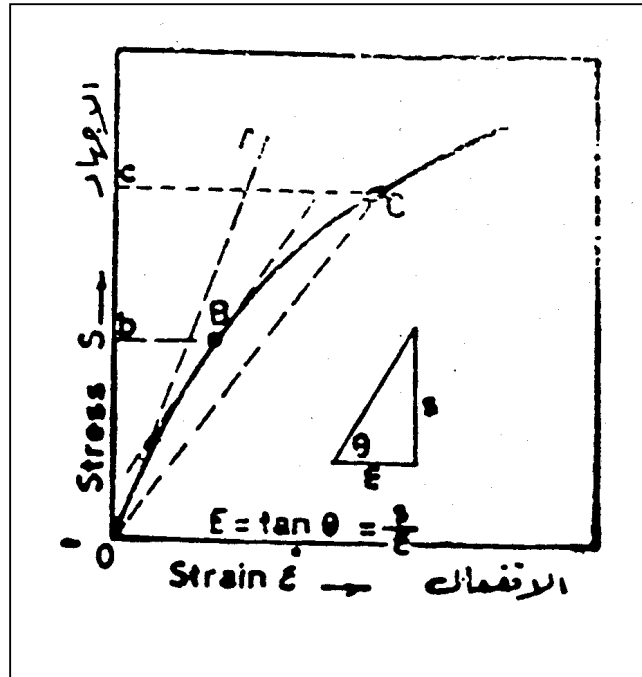
شكل ١,٦ : منحنيات الإجهاد والانفعال لأنواع مختلفة من الصلب



شكل 1.7 : منحنيات الإجهاد والانفعال لمواد مختلفة ويتضح

فيها اختلاف معامل يونغ باختلاف تلك المواد

وتقاس صلابة المعادن التي لا توجد بالمنحنى البياني للإجهاد والانفعال لها خط مستقيم بواسطة معايير التماس الأول (Initial tangent modulus) وهو عبارة عن ميل المماس لمنحنى الإجهاد والانفعال عند نقطة الأصل أي بداية المنحنى كما يتبين من الشكل ١.٨.



شكل ١,٨: تحديد معامل ينغ للمواد التي لا يكون لمنحنى الإجهاد والانفعال الخاص بها خط مستقيم

الخواص الميكانيكية

١ - الرجوعية (Resilience)

تقاس رجوعية المعدن تحت تأثير حمل الشدة بالطاقة (Energy) التي يمكن للمعدن أن يخترنها عند التحميل ثم يرجعها ثانية بعد إزالة الحمل أي يرجع المعدن كما كان قبل التحميل لذلك فإن الرجوعية هي خاصية في حدود المرونة فقط، وتساوي الرجوعية - أي قيمة الطاقة - الشغل المبذول بالتحميل لإحداث الاستطالة حتى حد التناسب (أي أكبر طاقة في حدود المرونة).

$$\text{الرجوعية} = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \Delta L = \frac{1}{2} \cdot \text{الحمل} \times \text{الاستطالة} \quad ١,١٩$$

وذلك لأن الحمل المسبب للاستطالة لم يكن ثابتاً بقيمة حد التناسب وإنما حدثت الاستطالة بتأثير حمل يزداد تدريجياً من الصفر حتى حد التناسب.

$$\text{الرجوعية} = \frac{1}{2} \cdot \text{الحمل المقابل لحد التناسب} \times \text{الاستطالة عند حد التناسب}$$

أي أن الرجوعية تساوي مساحة المثلث تحت الخط المستقيم من المنحنى البياني للحمل والاستطالة (أي منطقة المرونة) كما يتبين من الشكل رقم (١,٩).

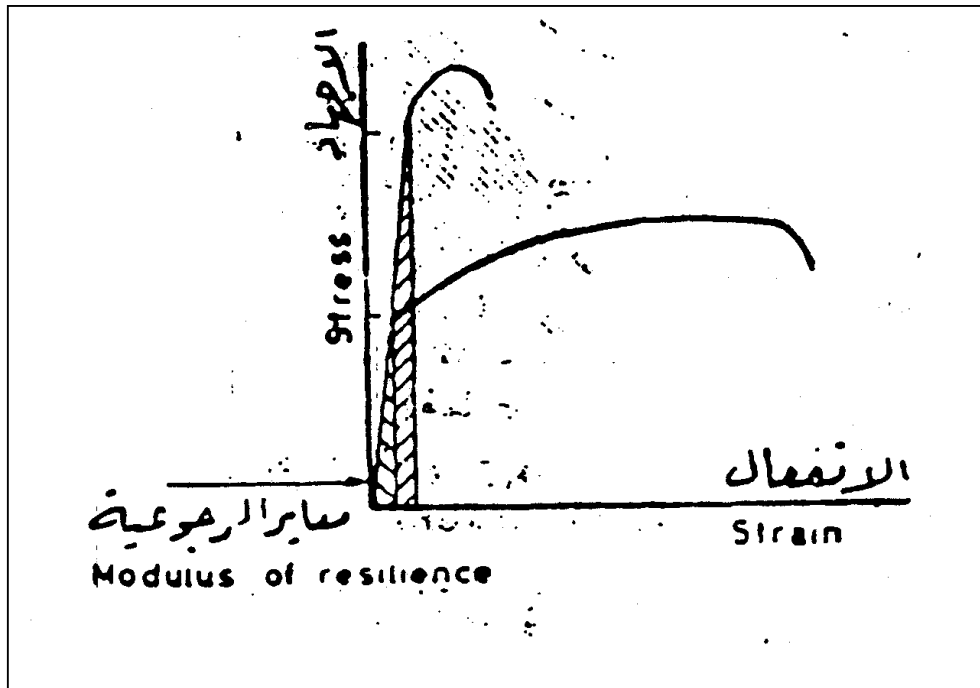
معامل الرجوعية (Modulus of Resilience) يساوي الرجوعية مقسومة على حجم العينة المختبرة أي الرجوعية لوحدة الحجم وتساوي:

$$\text{Modulus of resilience} = \frac{1}{2} F \frac{\Delta L}{A_0 L_0} \quad ١,٢٠$$

$$\text{Modulus of resilience} = \frac{1}{2} \frac{F}{A_0} \frac{\Delta L}{L_0} \quad ١,٢١$$

$$\text{Modulus of resilience} = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot e \quad ١.22$$

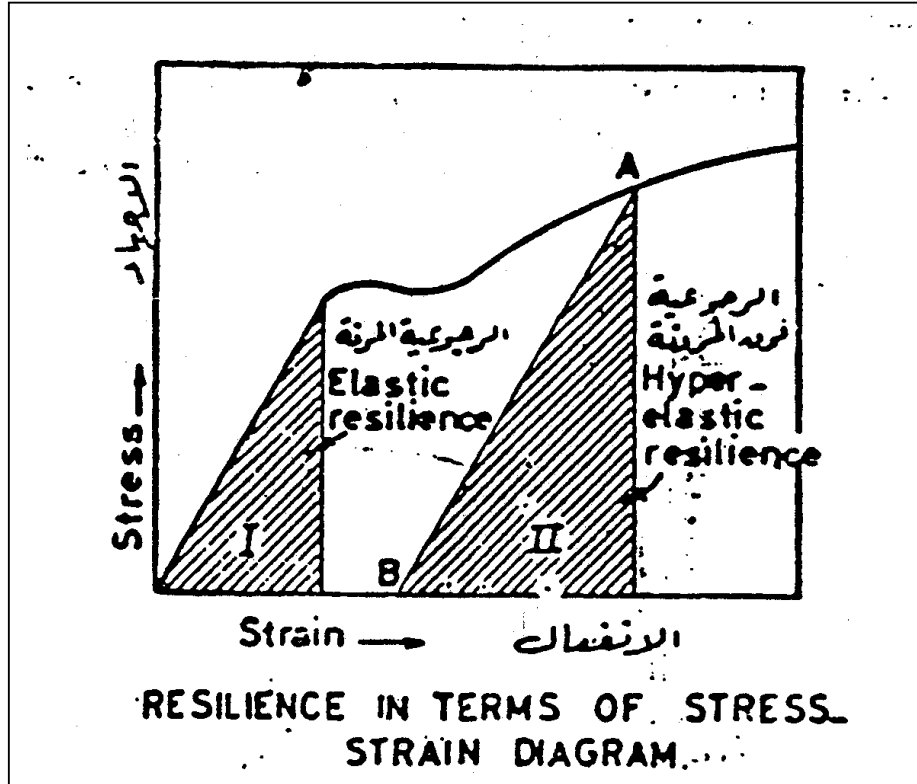
أي تساوي $\frac{1}{2}$ الإجهاد \times الانفعال عند حد التناسب أي المساحة تحت الخط المستقيم من المنحنى البياني للإجهاد والانفعال الهندسي (أي منطقة المرونة) كما يتبين من الشكل (١,٩).



شكل 1.9: معامل الرجوعية

أما الرجوعية فوق حد المرونة (Hyper-elastic resilience) فهي عبارة عن الطاقة التي يرجعها المعدن بعد إزالة الحمل المؤثر وهي جزء من الشغل المبذول بالتحميل فوق حد المرونة وهي عبارة عن الطاقة المرتجعة عن أي حمل (Recoverable energy) وتقاس بالمساحة تحت المنحنى البياني للحمل والاستطالة وهي المساحة المحدودة بخط يوازي خط المنحنى لمنطقة المرونة وأيضاً بالخط الموازي للمحور

الرأسي المبين للحمل كما يتبين من شكل (١,١٠) ويكون معامل تلك الرجوعية هي المساحة تحت المنحنى البياني للإجهاد والانفعال المقابلة للمساحة المذكورة تحت منحنى الحمل والاستطالة.



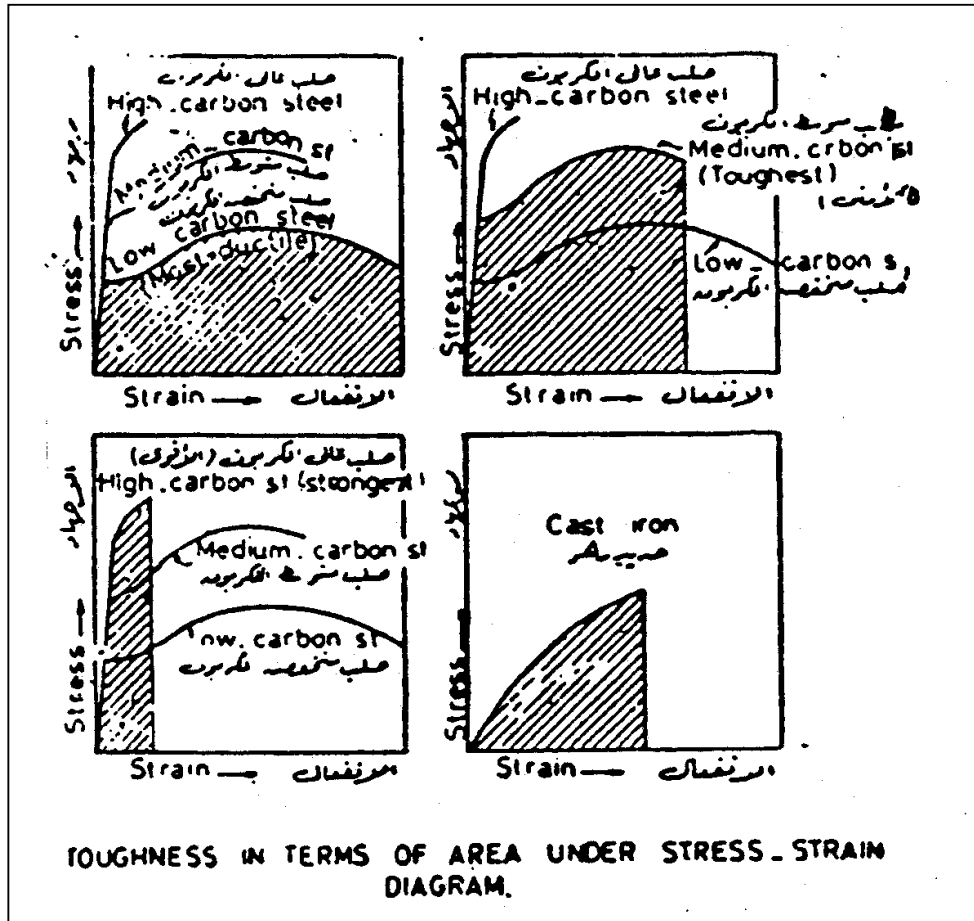
شكل ١,١٠ : الرجوعية بدلالة منحنى الإجهاد والانفعال

٢ - المتانة (Toughness):

إن الطاقة المبذولة بتحميل المعدن بالشد حتى الكسر تعبر عن المقاومة القصوى للمعدن لتحمل الحمل الديناميكي أي المقاومة للصدم الناتج من أحمال الشد. وهذه الطاقة عبارة عن مجموعة الشغل المبذول من الأحمال المؤثرة حتى الكسر أي تساوي مجموع الحمل في الاستطالة المقابلة لهذا الحمل حتى الكسر أي تساوي المساحة تحت المنحنى البياني للحمل والاستطالة. أما معايير المتانة (Modulus of Toughness) فهو عبارة عن المقاومة للصدم مقسومة على حجم عينة الاختبار والتي تساوي المساحة تحت المنحنى البياني للإجهاد والانفعال كما يتبين من الشكل (١,١١) فكلما ازدادت هذه المساحة كلما كبرت مقاومة المعدن للأحمال الديناميكية أي المقاومة للصدم.

$$\text{المتانة} = 0,5 \times (\text{حمل الخضوع} + \text{أقصى حمل}) \times \text{الاستطالة}$$

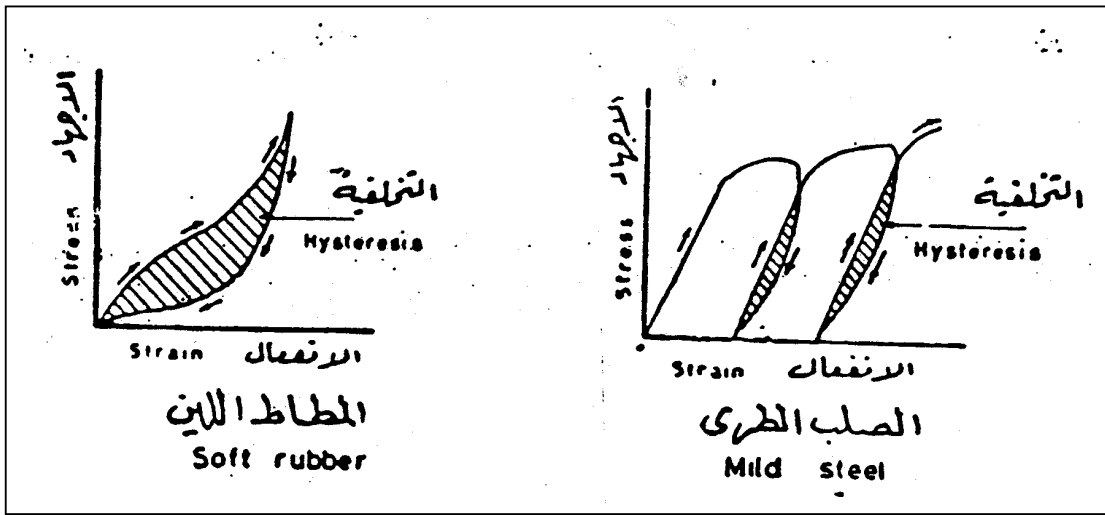
$$\text{معامل المتانة} = 0,5 \times (\text{حمل الخضوع} + \text{أقصى حمل}) \times \text{الاستطالة} / \text{حجم العينة}$$



شكل ١.١١: المتانة ويعبر عنها بالمساحة تحت منحنى الإجهاد والانفعال

٣ - التخلفية (Hysteresis):

إذ أجهد معدن فوق حد المرونة بحمل معين ثم أزيل هذا الحمل ثم حمل ثانية (Reloaded) فإن المنحنى البياني للإجهاد والانفعال قد يحتوي في بعض الأحيان على دورة (Loop) مكونة من خطين منحنيين بدلاً من خط مستقيم واحد كالمعتاد إذا أزيل التحميل ثم أعيد ثانية) كما يتبين من الشكل (١.١٢) وتسمى تلك الدورة بالدورة التخلفية. وتكون المساحة المحصورة داخل هذه الدورة من منحنى الإجهاد والانفعال عبارة عن الطاقة - لوحدة الحجم - المفقودة نتيجة دورة واحدة من إزالة الحمل ثم إعادة التحميل. وهذه الطاقة المفقودة تكون على هيئة حرارة كما توجد هذه الظاهرة أيضاً في بعض المواد غير المعدنية مثل المطاط.



شكل ١،١٢ : التخلفية للصلب المطري والمطاط

وظاهرة التخلفية مهمة جداً ويلزم معرفة مدى تواجدها للمادة المستخدمة في الإنشاءات والمباني من عدمه حيث إن وجودها يسبب ارتفاعاً في درجة حرارة المادة نتيجة الحرارة المتراكمة من الطاقة المفقودة باستمرار من التحميل وإزالة التحميل وهكذا الأمر الذي يؤثر على خواص المادة الميكانيكية مما قد يضعف مقاومتها ويغير في خواصها عن المطلوب لو لم توجد ظاهرة التخلفية.

٤ - المقاومة (Strength):

تنقسم مقاومة المعدن للشد إلى حالتين:

١ - مقاومة الشد في حد المرونة (Elastic strength)

وهي تساوي إجهاد الخضوع، وذلك للمعادن التي لها خاصية المرونة مع وجود منطقة خضوع بها وتساوي إجهاد الضمان للمعادن التي لها خاصية المرونة ولا يوجد بها منطقة خضوع.

$$\text{Elastic strength} = \frac{F_{yield}}{A_0} \text{ or } = \frac{F_{proof}}{A_0} \quad ١,٢٣$$

وتستخدم تلك المقاومة أي أقصى إجهاد مرن في أعمال التصميم لتعيين الإجهاد التصميمي (أي إجهاد التشغيل) وذلك بقسمة إجهاد الخضوع أو إجهاد الضمان على معامل الأمان (factor of safety) الذي يحددها المصمم (قيمة معامل الأمان أكبر من الواحد الصحيح وتكون حوالي ٢ في المعادن الحديدية).

٢ - المقاومة القصوى للشد (مقاومة الشد) : (Ultimate Tensile strength)

وهي تساوي الحمل الذي تعرضت له عينة الشد مقسوماً على المساحة الأصلية للمقطع المستعرض أي

$$\sigma_{UTS} = \frac{F_{maxi}}{A_0} \quad 1.24$$

وتفيد قيمة تلك المقاومة في مقارنة المعادن واختيار المعادن نتيجة لذلك في الأعمال الهندسية. ويلاحظ أنها لا تمثل المقاومة القصوى الحقيقية للمعادن المطيلة حيث إن المقطع المستعرض يقل كثيراً عن المقطع الأصلي ويحدث به رقبة مما يجعل إجهاد الشد المحسوب سابقاً والمبين للمقاومة القصوى للشد غير ممثل تماماً لهذه الحالة. أما في حالة المعادن القصيفة فتكون مقاومة الشد القصوى المحسوبة على الأساس المذكور تمثل تماماً المقاومة القصوى للمعدن لأن المقطع المستعرض لا يتغير عند الكسر - إلا بقيمة يمكن إهمالها - عن المقطع المستعرض الأصلي كما أن الحمل الأقصى هو نفسه حمل الكسر بخلاف المعادن المطيلة.

٥ - الممتولية (Ductility):

تقاس ممتولية المعادن تحت تأثير أحمال الشد بحساب النسبة المئوية للاستطالة (%Elongation) أو النسبة المئوية للنقص في مساحة المقطع المستعرض (%Reduction of Area) ويكون ذلك باستخدام نتائج اختبار الشد كالاتي:

١ - النسبة المئوية للاستطالة: وهي النسبة المئوية للاستطالة بعد الكسر منسوبة إلى طول القياس أي :

$$\%Elongation = 100 \times \frac{\Delta L}{L_0} \quad 1.25$$

$$\%Elongation = 100 \times \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad 1.26$$

$$= \text{Max strain} \times 100 \quad 1.27$$

ويمكن مقارنة ممتولية المعادن مباشرة من المنحنى البياني للحمل والاستطالة عن طريق قيمة الاستطالة عند الكسر (أي أكبر استطالة بالمنحنى) أو من المنحنى البياني للإجهاد والانفعال العادي عن طريق قيمة أكبر انفعال.

٢ - النسبة المئوية للنقص في مساحة المقطع المستعرض:

هي النسبة المئوية لأكبر نقص في مساحة مقطع عينة الاختبار بعد الكسر منسوبة إلى المساحة الأصلية لمقطع عينة الاختبار أي: النسبة المئوية للنقص في مساحة المقطع المستعرض

$$\% \text{Reduction of area} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad 1.28$$

أنواع ماكينات اختبار الشد

١ - ماكينات اختبار هيدروليكية "Hydraulic Machine":

وفيها يستخدم الضغط الهيدروليكي للزيت لدفع الرأس المتحركة للماكينة ومن ثم تحميل قطعة الاختبار.

٢ - ماكينات اختبار ذات الترس واللولب "screw Gear":

يكون التحميل فيها بوسائل ميكانيكية حيث تستخدم مجموعة من التروس للتحليل.

١ - الماكينة الهيدروليكية "Hydraulic Machine"

يوجد لهذه الماكينة رأس ثابتة وأخرى متحركة ولكن حركة الرأس المتحركة "المسبب للأحمال المؤثرة على العينات المختبرة" تكون بواسطة الضغط الهيدروليكي للزيت.

طريقة عملها :

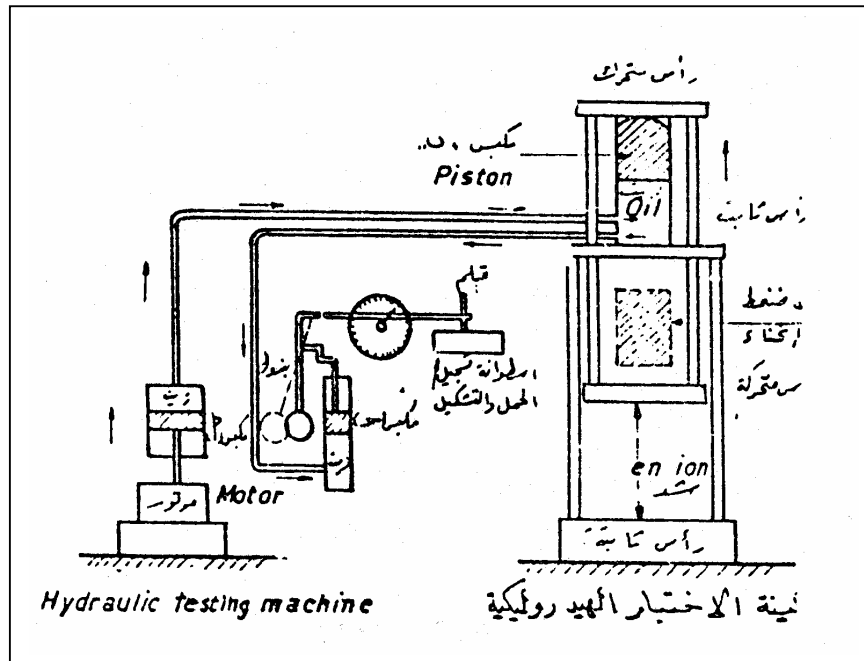
وفيها يضغط الزيت بتشغيل الموتور الكهربائي والمضخة الهيدروليكية ويرتفع المكبس ويرفع معه الجزء المتحرك من الماكينة فيسبب شدا على قطعة الاختبار المثبتة بينه وبين الجزء الثابت من الماكينة أو ضغطاً أو انحناء على قطعة الاختبار الموجودة أعلاه. ولقياس الحمل المؤثر على قطعة الاختبار ينقل ضغط الزيت السائل الموجود بالأسطوانة بواسطة ماسورة إلى أسطوانة أخرى صغيرة ويكون نتيجة هذا الضغط أن يتحرك المكبس تبعاً لذلك فيؤثر العمود المتصل مباشرة بالمكبس على المبدول الذي ينقل حركته إلى المؤشر الذي يتحرك على مقياس مدرج ليبين مقدار الحمل الواقع على قطعة الاختبار كما في الشكل ١،١٣. ويلاحظ في ماكينات الاختبار هذه أن وجود فقاعات من الهواء في دورة الزيت ينتج عن عدم الدقة في القراءات التي نحصل عليها ولذلك يجب عند إجراء أي إصلاح بالماكينة القيام بعملية طرد الفقاعات الهوائية إن وجدت قبل التشغيل . كما يلاحظ أنه يمكن تغيير ثقل أو ذراع البندول أو الاثنين معاً ويصحب ذلك تغيير المقياس المدرج بآخر مرادف له تبعاً للثقل الجديد وهذا يمكننا من جعل سعة ودقة الماكينة مناسبة للحمل الذي يمكن أن تتحمله قطعة الاختبار وهي الوسيلة الوحيدة للتأثير بأحمال كبيرة تتراوح ما بين (٢٠ : ٢٠٠٠ طن) في المعامل وفي غير المعامل تصل إلى ٤٥٠٠ طن .

٢ - الماكينة ذات الترس واللولب (Screw Testing Machine) :

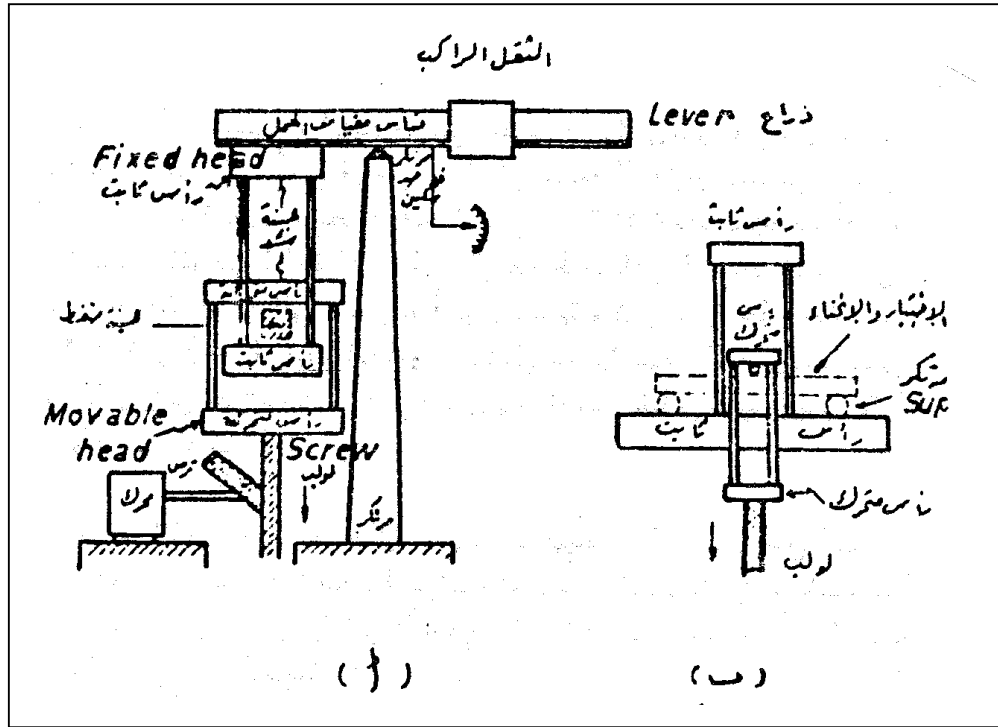
لهذه الماكينة نفس الأجزاء ونفس طريق التشغيل تقريبا إلا أن الفارق بينهما أن الرأس المتحرك في هذه الماكينة موصول بلولب Screw وهذا اللولب موصول بترس Gear وهذا الترس موصول بمحرك Motor .

يقوم المحرك بتدوير الترس وهذا الترس يحرك اللولب الذي بدوره يقوم بتحريك الرأس المتحرك فيتم شد أو ضغط العينة.

كما يتصل الإطار الثابت للماكينة برافعة مدرجة ترتكز على مرتكز ذو حد سكوني مناسب لها ويتحرك على ذراع الرافعة ثقل راكب يتحرك ليعمل على اتزان الرافعة وجعلها في وضع أفقي وهذا يساعد على تثبيت رأس ماكينة الاختبار الثابت ويوضح ذلك الشكل رقم ١،١٤



شكل ١،١٣ : ماكينة اختبار هيدروليكية



شكل ١،١٤ : ماكينة ذات الترس واللولب ١ - اختبار الشد والضغط ب - اختبار الانحناء

طرق قياس الأحمال بماكينات الاختبار

١ - أوزان القياس Measuring Weight: تستعمل في أضيق الحدود.

٢ - أوزان القياس والرافعة ذات النسبة الثابتة: يندر استخدامها.

٣ - الوزن الثابت والرافعة المتغيرة:

تستخدم في كثير من ماكينات الاختبار. وتتلخص في موازنة الحمل الذي يؤثر على قطعة الاختبار المثبتة من الذراع القصير للرافعة الأفقية بواسطة ثقل ثابت يتحرك على الذراع الطويل الذي يدرج بحيث يعطي قيمة الحمل المؤثر على قطعة الاختبار مباشرة وذلك عندما تتزن المرافق وتأخذ وضعاً أفقياً.

وهناك طريقة أخرى تأخذ فيها الرافعة شكل البندول وتمتاز هذه الطريقة عن الطريقة السابقة في أن الأجهزة تحتاج إلى تحريك الثقل لموازنة الحمل في حين أن الموازنة في طريقة البندول تحدث تلقائياً ويبين المؤشر الذي يتحرك على مقياس مدرج الحمل مباشرة. ويلاحظ أن البندول عادة على شكل رافعة مركبة وذلك حتى يمكن موازنة الأحمال الكبيرة بأثقال ذات قيمة معتدلة.

٤ - الضغط الهيدروليكي:

يمكن قياس أي حمل لقياس الضغط الناتج من التأثير بهذا الحمل على سائل محبوس في وعاء أو أنبوبة . وهناك وسيلتان معروفتان لقياس الأحمال بهذه الطريقة وهما :

أ (المانومتر: وهو عبارة عن أنبوبة زجاجية تثبت في وضع رأسي ويوضع بها سائل كالزئبق يمكن له أن يرتفع إلى مستوى معين بحيث يوازن الضغط الواقع عليه من تأثير الحمل الذي يبين تدريج الأنبوبة المقابل للمستوى الذي يصل إليه السائل. ومن الواضح أن استعمال المانومتر يقتصر على قياس الأحمال البسيطة ويجوز استعماله لقياس أحمال أكبر باستخدام رافعة تنقص قيمة الحمل المؤثر على السائل.

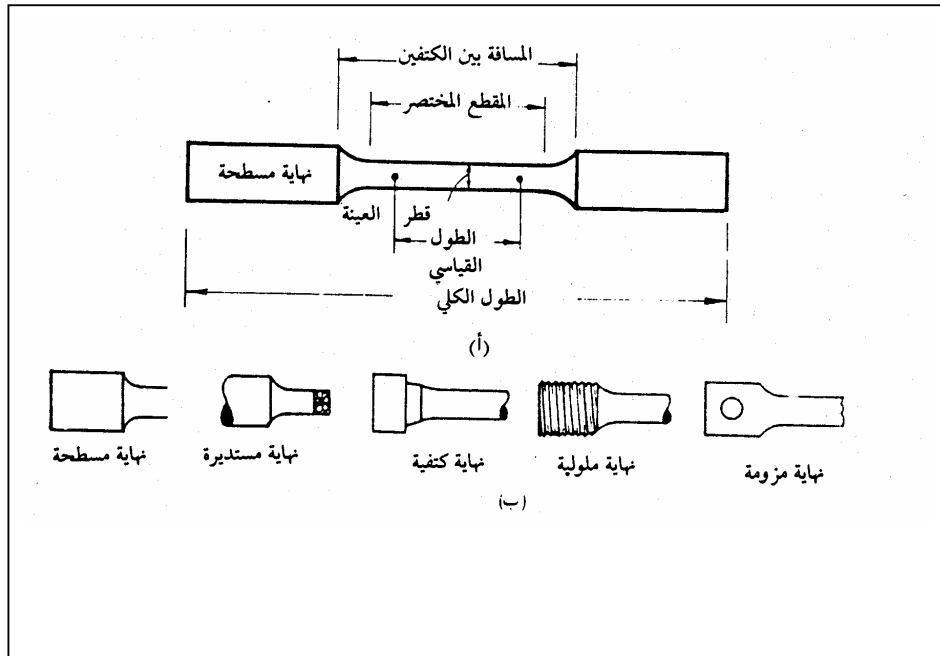
ب (الدينامومترات: تستخدم عادة لقياس الطاقة. ونظرية عملها في قياس التشكيلات أو سهم الانحناء الذي يحدث في الجسم المرن نتيجة تأثير الحمل. وفي ماكينات اختبار المواد يستعمل نوعان من الدينامومترات: أحدهما يستخدم ميزاناً زنبركياً ويمكن بواسطته القياس المباشر للحمل الواقع على عينات صغيرة وقد يكون متصلاً برافعة مركبة أو مجموعة هيدروليكية والآخر يقاس الحمل فيه عن طريق سهم الانحناء المرن لقضيب أو هيكل أو حلقة بدلاً من الميزان المستخدم في النوع الأول.

طرق تثبيت ووضع العينة بماكينة الاختبار

تثبت العينة المختبرة بالمماكينة تبعاً لحالة التحميل وشكل ونوع العينة (شكل 1.15).

أ (في حالة اختبار الشد: تستخدم كلابات خابورية "Wedge Grips" أو مساكات لتثبيت العينة.

ب (في حالة اختبار الضغط: توضع العينة بين لوحين معدنيين وذلك بين وجهي ماكينة الاختبار.



شكل 1.15 - شكل لعينة قياسية

ب - أنواع النهايات للعينات القياسية

الذي يهمننا عند الاختبار هو معرفة الطول المقاس "Gauge length" والطول الكلي "Overall Length" وذلك حتى نعرف مقدار الاستطالة التي حدثت بعد إجراء التجربة لكي نحسب قيمة الانفعال "Strain" وأيضاً يهمننا معرفة مساحة مقطع العينة لكي نستطيع حساب الإجهاد "stress".

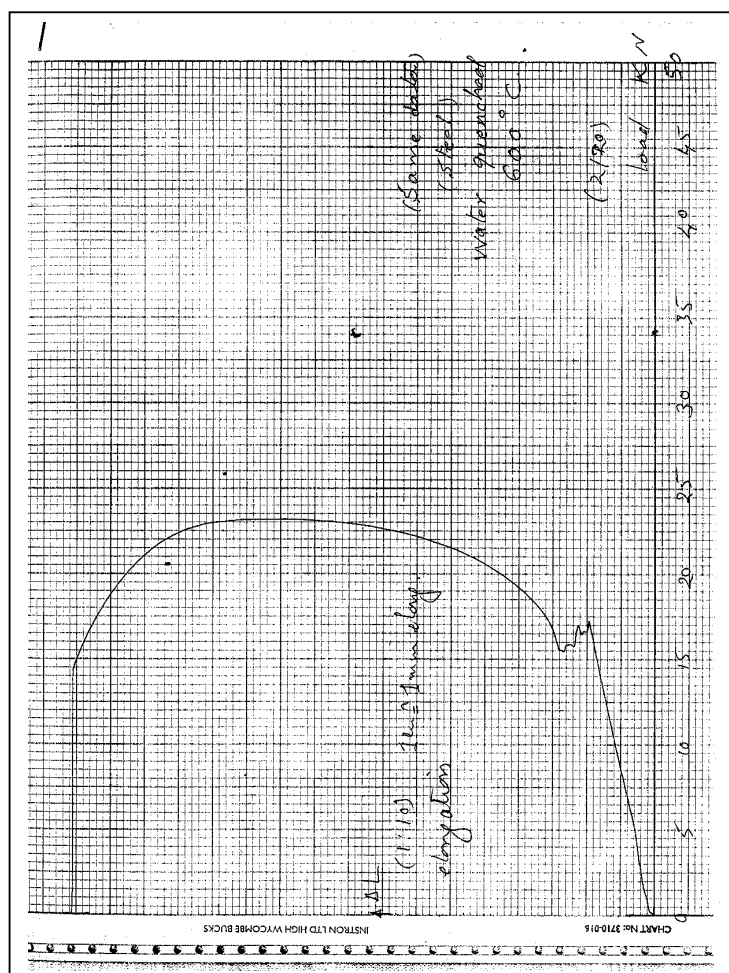
الاشتراطات الواجب توافرها في ماكينة الاختبار

- ١- يجب أن تكون الماكينة دقيقة "Accurate" في بيان الحمل على طول مدى الحمل التي يمكن أن تؤثر فيه الماكينة ويمكن التجاوز عن الأخطاء "Errors" التي تقل عن ١٪ من قيمة الحمل وغالباً تكون أقل من ٠,٥ ٪ .
- ٢ - يجب أن تكون الماكينة حساسة لإمكان بيان التغير في الأحمال الصغيرة ، أي يمكن تسجيل تغيير في الحمل قدرة ٠,٥ ٪ من قيمة الحمل.
- ٣ - يجب أن يكون كل من فكي الماكينة متمركزاً على استقامة واحدة من الفك الآخر.
- ٤ - يجب ألا يسمح للفك المتحرك للماكينة بالدوران أو الالتواء أو التحرك جانبياً حتى لا يغير ذلك من حالة الحمل المؤثر به على العينة المختبره.
- ٥ - يجب أن يكون التأثير بالحمل منتظماً ويمكن التحكم فيه وأن يكون في حدود سرعة معينة.
- ٦ - يجب أن تكون الماكينة خالية من الاهتزازات الشديدة حتى لا يؤثر ذلك من التحميل وفي نتائج الاختبارات.

الأسئلة

- ١ - عرف الإجهاد الحقيقي والإجهاد الهندسي؟
- ٢ - استنتج العلاقة الآتية: $\sigma_{tru} = \sigma (e+1)$
- ٣ - استنتج العلاقة الآتية: $L_f = L_0 (e+1)$
- ٤ - سلك من معدن قطره اسم وطوله ١٠م يراد استخدامه لرفع حاويات. أوجد أقصى حمل يمكن للسلك رفعه دون أن تزيد قيمة استطالته عن ٣سم ؟ علما أن معامل يونغ young's modulus للسلك هو 100 GPa ؟
- ٥ - ارسم منحنى (مثالي) الإجهاد والانفعال لاختبار شد وبين عليه جميع المعلومات المفيدة.
- ٦ - باستخدام الرسم، عرف: (١) الممتولية Ductility (٢) الرجوعية Resilience
- ٧ - عينة من الصلب طولها ٥٠ مم تم إجراء اختبار الشد لها حتى كسرت فكانت استطالتها النهائية ١٠ مم. احسب مطيلية Ductility العينة؟
- ٨ - اذكر الاشتراطات الواجب توافرها في مكائن الشد.
- ٩ - أجرا اختبار شد على قطعة اختبار قياسية متناسبة طويلة من الصلب الطري المعالج حراريا ذات قطر مستدير ٨ مم وكان منحنى الحمل والاستطالة هو الموضح في الرسم المجاور ، احسب الآتي:
 - ١ -معامل يونغ (E)
 - ٢ - إجهاد الخضوع الأعلى (σ_{yup})
 - ٣ - إجهاد الخضوع الأدنى (σ_{yl})
 - ٤ - مقاومة الشد القصوى (σ_{UTS})
 - ٥ - إجهاد الكسر (σ_f)
 - ٦ - الرجوعية (R)
 - ٧ - معايير الرجوعية
 - ٨ - المتانة (T)

٩ - معايير المتانة





المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

اختبار المواد

اختبار الضغط

اختبار الضغط

٢

المحتوى:

اختبار الضغط وعيناته

الأهداف:

- ١ - معرفة اختبار الضغط و منحنى الإجهاد والانفعال في اختبار الضغط
- ٢ - معرفة الهدف من اختبار الضغط
- ٣ - معرفة أنواع عينات الضغط

الوقت المتوقع للتدريب:

ساعتان

الوسائل المساعدة:

ماكينة الاختبار العامة لإجراء اختبار الضغط

مقدمة

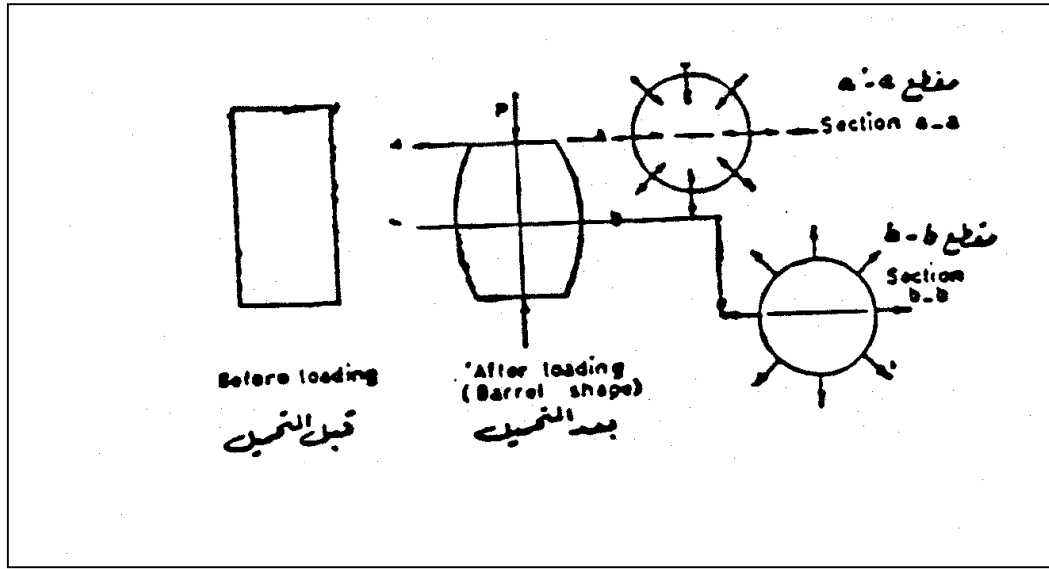
إن اختبار الضغط بالنسبة لاتجاه الحمل المؤثر ما هو إلا حالة عكسية لاختبار الشد ويستخدم عادة اختبار الضغط كأساس لقبول المواد غير المعدنية مثل الخرسانة والحجارة والأخشاب وغيرها أو بغرض بيان خواص المواد المعدنية الميكانيكية في الضغط. فمثلاً في المواد المطيلية يمكن تعيين إجهاد الخضوع والرجوعية المرنة وكذلك معايير المرونة باستخدام اختبار الضغط، أما المواد القصيفة فيعين فقط المقاومة للضغط. توجد بعض العوامل التي تجعل اختبار الضغط غير صالح لإعطاء نتائج دقيقة والتي تمنع من استخدامه كاختبار قبول للمواد أو كاختبار معلمي يعتمد على نتائجه في بيان خواص المواد بكفاية ومن هذه العوامل ما يأتي :

- ١ - صعوبة التأثير بحمل الضغط تأثيراً محورياً حقيقياً على العينة المختبرة.
- ٢ - حالة عدم الاتزان "Unstable" النسبية للتحميل بالضغط بالمقارنة بالتحميل بالشد.
- ٣ - الاحتكاك "Friction" بين رأس الماكينة وبين نهايتي العينة المختبرة وهذا الاحتكاك يغير تغييراً ملحوظاً لنتائج الاختبار عن مثيلاتها لو أجري اختبار الضغط بدون وجود الاحتكاك.
- ٤ - الكبر النسبي للمقطع المستعرض لعينة الضغط المستخدم للحصول على درجة مناسبة من الاتزان للعينة أثناء التحميل ويتسبب ذلك في ضرورة تواجد ماكينات الاختبار ذات السعة العالية نسبياً أو يتسبب في استخدام عينات اختبار صغيرة بدرجة تجعل من الصعوبة الحصول على الدقة المناسبة لنتائج الاختبار.

سلوك المعادن تحت تأثير الضغط الاستاتيكي:

المنحنى البياني للحمل والتشكل:

إذا تعرضت عينة معدنية اسطوانية الشكل بارتفاع قصير نسبياً إلى حمل ضغط فإنها تتضغط ويتسبب عن ذلك أن يحدث للعينة تشوه برميل "Barrel" نتيجة الزيادة في العرض المصاحبة للنقص في الطول وتواجد الاحتكاك بين سطحي نهايتي العينة ورأس ماكينة الاختبار مما يسبب قلة الزيادة في العرض عند مقاطع نهايتي العينة عنها في مقاطع منتصف العينة بقيم تدريجية تبعاً لمدى تأثير الاحتكاك كما هو موضح في الشكل ٢،١ .



شكل ٢,١: حدوث الشكل البرميلي في اختبار الضغط

ويعتبر الإجهاد الحادث من التحميل في حدود المرونة منتظماً في توزيعه على مقطع العينة ويساوي حمل الضغط المؤثر مقسوماً على المساحة الأصلية للمقطع المستعرض أي أن :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad 2.1$$

أ (إذا كانت العينة من معدن مطيل " مثل الصلب الطري " :

فإن الاستمرار في التحميل يزيد من انضغاطها ثم تتفلطح وتستمر في ذلك ولا يحدث لها كسر مهما ازداد الحمل .

ب (إذا كانت العينة من معدن نصف مطيل " مثل النحاس الأصفر " :

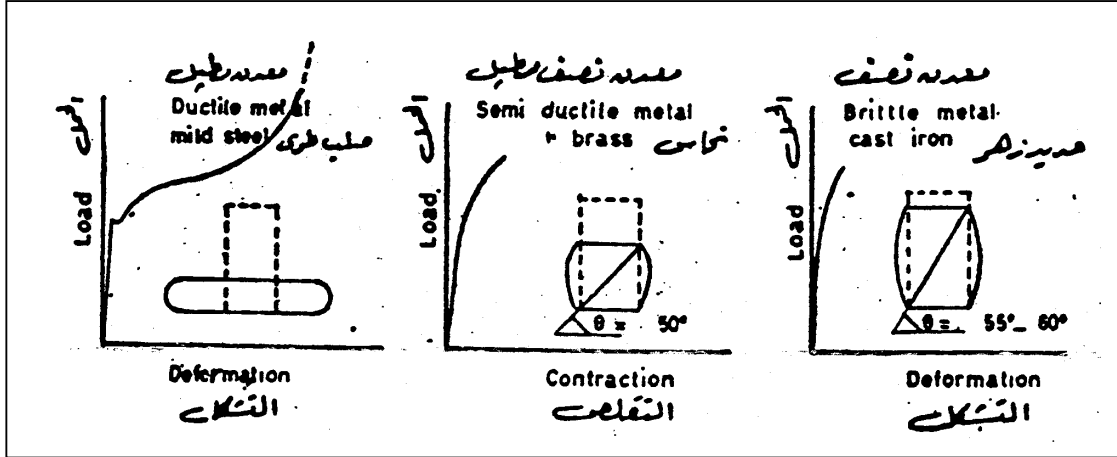
فإنها تتضغط مع ازدياد التحميل ثم تنكسر على مستوى يعمل ٥٠ درجة مع الأفق حيث يلاحظ من المنحنى إما تواجد أو عدم تواجد منطقة خضوع تبعاً لظروف معدن العينة من الوجهة التشغيلية أو المعاملة الحرارية . كما يلاحظ وجود حد للمقاومة القصوى للعينة ويعتبر الإجهاد الأقصى للضغط (σ_{max}) مساوياً الحمل الأقصى (F_{max}) مقسوماً على المساحة الأصلية للمقطع المستعرض (A_0) أي أن :

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad 2.2$$

ج (إذا كانت العينة من معدن قصيف "الحديد الزهر" :

فإنها تتضغط قليلاً جداً ثم تنكسر على مستوى يعمل زاوية حوالي ٥٥° - ٦٠° مع الأفقي ويكون الملاحظ في المنحنى البياني للحمل والانضغاط عدم تواجد منطقة خضوع وتواجد حد للمقاومة القصوى

للضغط ويعتبر الإجهاد الأقصى للضغط مساوياً الحمل الأقصى مقسوماً على المساحة الأصلية للمقطع المستعرض كما هو موضح في الشكل ٢.2



شكل ٢.٢: سلوك المعادن المطيلة والنصف مطيلة والقصفة تحت تأثير حمل الضغط

المنحنى البياني للإجهاد والانفعال في الضغط

يمكن رسم المنحنى البياني للإجهاد الهندسي والانفعال الهندسي في الضغط باستخدام المنحنى البياني للحمل والتشكل واعتبار أن:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

الاجهاد الهندسي في الضغط

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

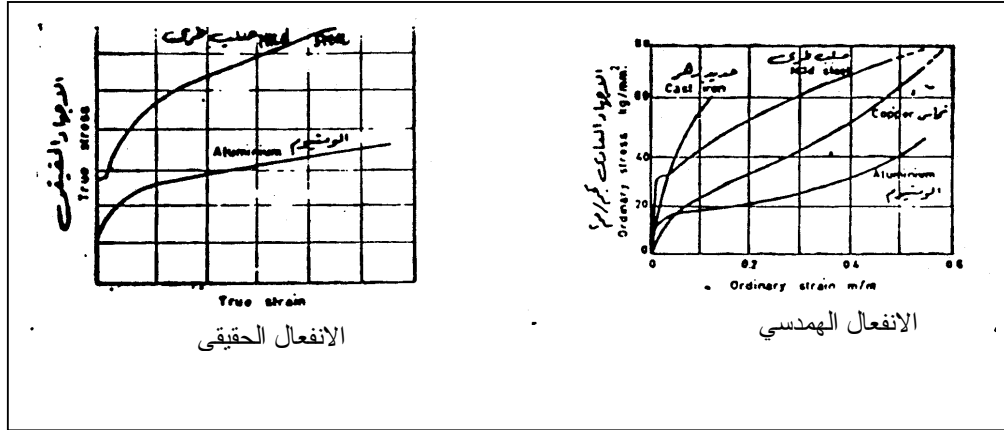
الانفعال الهندسي في الضغط

حيث أن: F الحمل المؤثر

A_0 مساحة المقطع الأصلية للعينة

ΔL التشكل

L_0 الطول الأصلي للعينة



شكل ٢,٣: منحنيات الإجهاد والانفعال الحقيقي والهندسي

كما يمكن رسم المنحنيات البيانية للإجهاد والانفعال الحقيقي في الضغط على أساس أن:

$$\sigma_{Tr} = \frac{F}{A_i} \quad \text{الإجهاد الحقيقي في الضغط}$$

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A_i} \quad \text{الانفعال الحقيقي في الضغط}$$

حيث أن:

F الحمل المؤثر.

A_0 المساحة الأصلية للمقطع المستعرض.

A_i مساحة أكبر مقطع مستعرض للعينة عند تأثير الحمل عليها.

والأشكال السابقة تبين نوعية المنحنيات الهندسية والحقيقية للإجهاد والانفعال في اختبار الضغط.

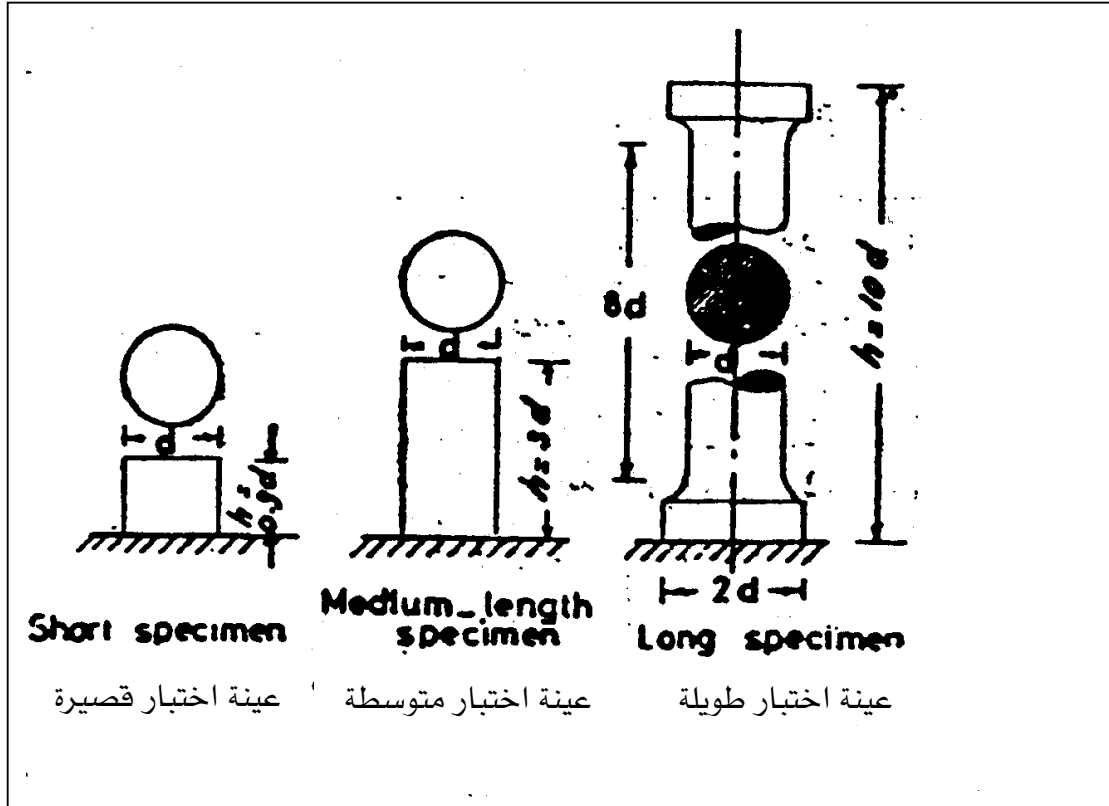
أنواع عينات اختبار الضغط القياسية

أ (العينة الطويلة: ويكون الطول فيها يساوي من ٨ إلى ١٠) مرات قطر المقطع المستخدم عند إجراء اختبار الضغط بغرض رسم المنحنى البياني للحمل والتشكل حتى يمكن تركيب أجهزة قياس التغيير في الطول على العينة وكذلك بغرض تعيين حد التناسب وإجهاد الخضوع للضغط .

ب (العينة المتوسطة : ويكون فيها الطول يساوي ٣ مرات قطر المقطع وتستخدم عند تعيين مقاومة الضغط للمعادن .

ج (العينة الصغيرة : ويكون فيها الطول يساوي ٠,٩ من قطر المقطع وتستخدم لاختبار معادن المحامل "Bearing metals" حيث يكون تأثير الاحتكاك الموجود عند نهاية العينة مشابهة لحالة تشغيل معادن

المحامل كما في شكل ٢,٤



شكل ٢,٤: عينات الضغط المعدنية القياسية

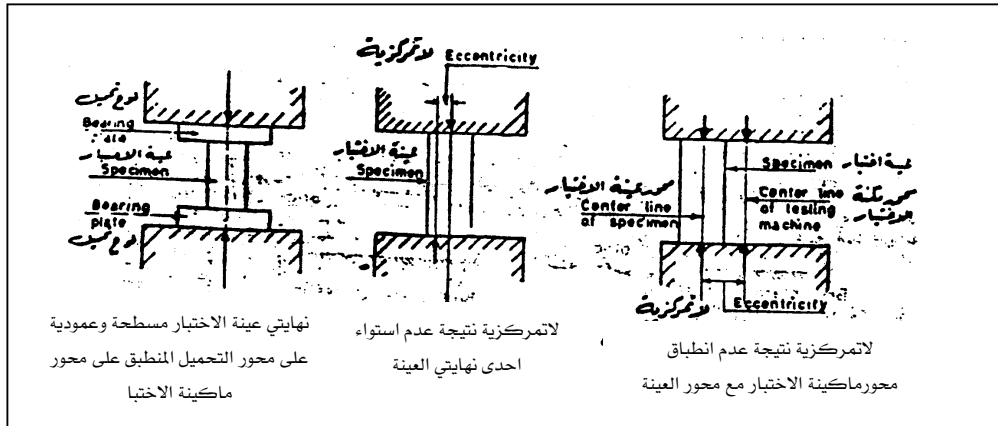
الشروط الواجب توافرها في عينات الضغط للمعادن

يجب أن تستوفي عينات اختبار الضغط للمعادن الاشتراطات الآتية:

- ١ - أن تكون العينات ذات مقطع دائري أي تكون أسطوانية وذلك حتى يكون توزيع التحميل منتظماً على سطح كل من نهايتي العينة عند التأثير بالحمل بماكينة الاختبار.
- ٢ - أن تكون العينات ذات ارتفاع لا يتجاوز ١٠ مرات قطر المقطع (أي أقل بعد في المقطع المستعرض) حتى لا يحدث انبعاج والذي يسبب تواجد عزوم انحناء على العينة بجانب حمل الضغط.
- ٣ - يكون سطحاً نهاية العينة مستويين متوازيين وعموديين على محور العين وذلك حتى يكون التحميل محورياً.

الاحتياطات اللازم مراعاتها عند إجراء الضغط

- ١ - أن يكون الحمل المؤثر على العينة صحيحاً قيمة واتجاهها أي أن ما تبينه ماكينة الاختبار هو نفسه المؤثر على العينة. ولكي يكون الحمل المؤثر صحيحاً في الاتجاه أي رأسياً دائماً يجب أن يكون رأس ماكينة الاختبار ذات مرتكز كروي وهذا المرتكز يعدل مباشرة من أي انحراف في ميل الحمل ويجعله محورياً دائماً.
- ٢ - يجب منع لا محورية التحميل ويكون ذلك بجعل كل من نهايتي العينة مسطحاً وعمودياً على محور العينة كذلك يجعل محور العينة منطبقاً مع محور ماكينة الاختبار.
- ٣ - يجب منع حدوث الانبعاج الجانبي ويكون ذلك بجعل ارتفاع العينة المختبرة لا يزيد على ١٠ مرات قطر المقطع المستعرض.



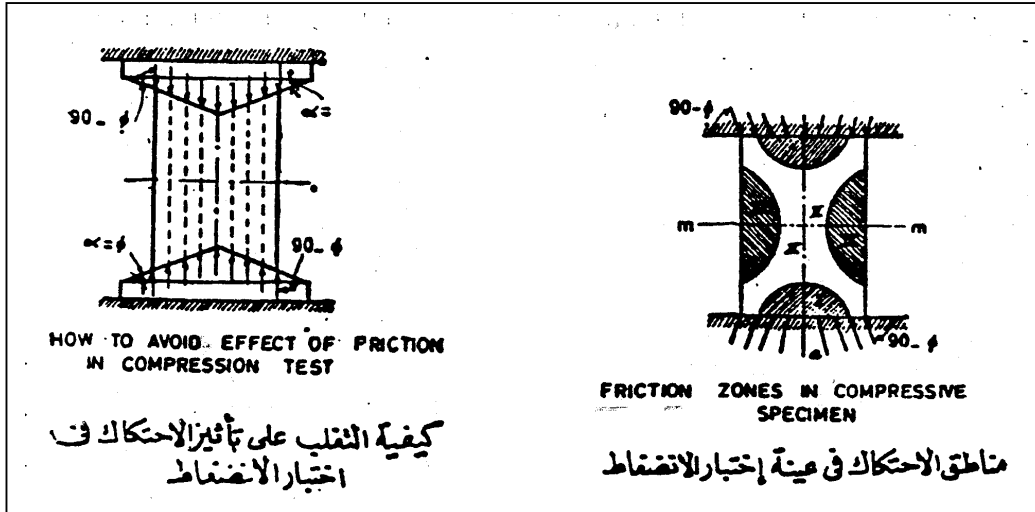
شكل ٢,٥: بعض أوضاع عينة اختبار الضغط بماكنة الاختبار

طرق تجنب تأثير الاحتكاك بين سطحي عينة الاختبار ورأس الماكينة

في اختبار الضغط لا يوجد توزيع منتظم للإجهادات على عينة الاختبار ويرجع ذلك إلى وجود الإجهادات القطرية والمماسية لقوى الاحتكاك بين سطحي قطعة الاختبار وبين رأس ماكينة الاختبار وللتغلب على ذلك يتم تشحيم هذه الأسطح المعرضة للاحتكاك باستعمال مادة مناسبة للتشحيم ولا يمكن تجنب القوى المسببة للاحتكاك تماماً بالتشحيم عندما تكون الأسطح غير منتظمة.

وقد اقترح "ميسير دينا" طريقة للحصول على شكل منتظم بقطعة الاختبار وذلك بجعل قطعة الاختبار من ثلاثة أجزاء وبذلك ينتظم التغير في شكل الجزء الأوسط من عينة الاختبار وهذه الطريقة تتبع في المواد ذات التغير القليل في الشكل ويلاحظ عدم قياس الانكماش في الجزء الأوسط من العينة بواسطة حركة رأس ماكينة الاختبار.

وهناك طريقة أخرى للتقليل من الاحتكاك وذلك بلف رأس ماكينة الاختبار بحيث يميل بزاوية (α) على سطحي عينة الاختبار (حيث α تساوي زاوية الاحتكاك بين السطحين) وبذلك يتوازي اتجاه الإجهادات مع محور قطعة الاختبار وتحفظ قطعة الاختبار بشكلها الأسطواني بعد الاختبار وأيضاً بدهان وتشحيم سطحي عينة الاختبار يمكن تقليل الاحتكاك مع رأس الماكينة .



شكل ٢,٦: مناطق الاحتكاك وكيفية التغلب عليها في عينة اختبار

الأسئلة

١ - في ظل وجود اختبار الشد ، ما الحاجة لاختبار الضغط؟

٢ - خزان ماء مدعم بأربعة أعمدة من الحديد من زواياه الأربع مساحة مقطع الواحد منها ٠,٥ م^٢ . يسبب الثقل الموجود بالخزان انفعالا قدره ٠,٠٠١ لكل عمود. إذا علمت أن معامل يونغ young modulus لحديد الأعمدة هو ٢٠٠ GPa احسب ثقل الخزان؟



المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

اختبار المواد

اختبار الصدم

اختبار الصدم

٣

المحتوى:

اختبار الصدم وأنواعه ونظريته

الأهداف:

- ١ - معرفة اختبار الصدم ونظريته
- ٢ - حساب طاقة الصدم
- ٣ - معرفة أنواع اختبار الصدم وعيناته المختلفة
- ٤ - معرفة تأثير درجة الحرارة على اختبار الصدم

الوقت المتوقع للتدريب:

أربع ساعات

الوسائل المساعدة:

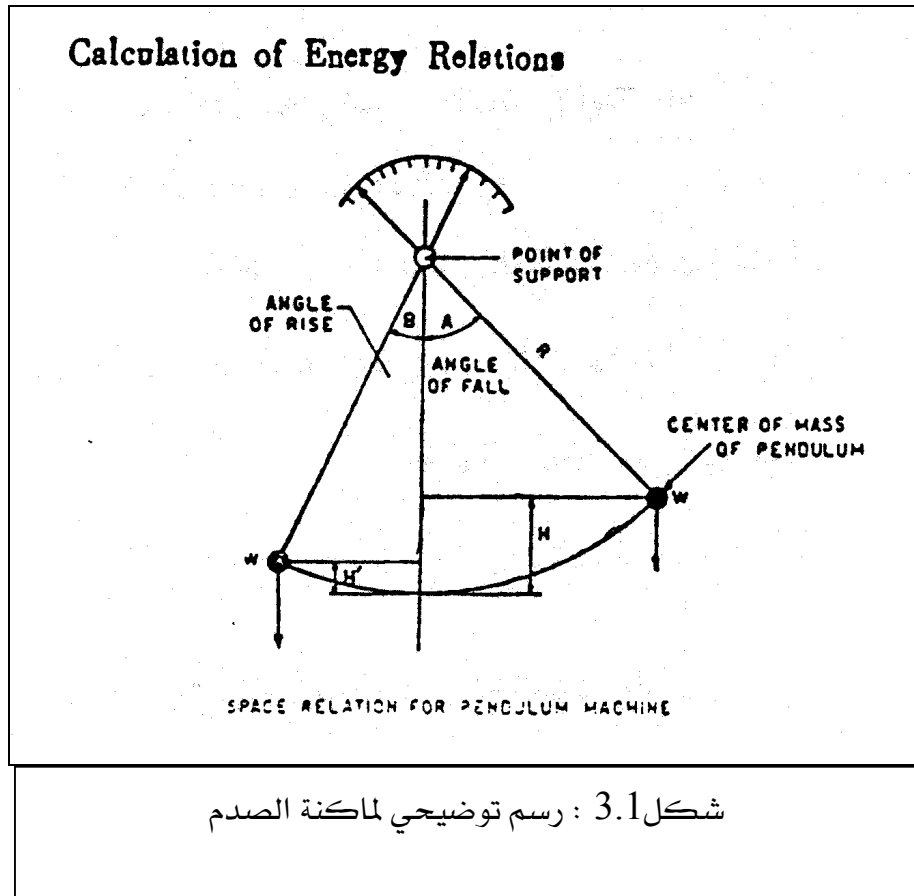
ماكينة اختبار الصدم

مقدمة

يعد اختبار الصدم نوعاً مهماً من أنواع التحميل الديناميكي ، والغرض منه هو بيان مدى مقاومة المادة للانهايار بتأثير قوى الصدم (التحميل الديناميكي) تحت ظروف التشغيل ، كما يستخدم اختبار الصدم لبيان تأثير تواجد الشروخ في العينات المختبرة على مقاومتها والتي تسبب ضعفها في تحميل الصدم ، وكذلك لبيان تأثير المعاملات الحرارية على المعادن وتوضيح مدى قسافتها.

اختبار الصدم القياسي : Standard Impact test

ويجري على قطعة اختبار قياسية محزوزة تعرض إلى قوى صدم تكسرها ثم نعين قيمة الشغل المبذول لكسر قطعة الاختبار وتعتبر قيمة هذه الطاقة أساساً لمقارنة المواد مع بعضها البعض من وجهة تحملها للصدم. وهناك عدة أنواع من اختبارات الصدم القياسية مثل تشاربي وأيزود وستارت وستانتون، ويعتبر اختبار تشاربي *Charpy* وأيزود *Izod* هما الاختباران الأساسيان في اختبارات الصدم .



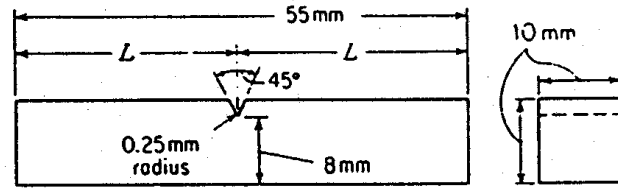
وفي كلا الاختبارين يؤثر حمل الصدم على العينة المختبرة من ثقل متأرجح من ارتفاع (H) له وزن محدد (W) فإذا أطلق هذا الثقل فإن مساره يكون دائرة وعند اصطدامه بالعينة المختبرة (المحزوزة) فإنه يصعد إلى ارتفاع آخر (H) وبذلك تكون الطاقة المستعملة في كسر العينة هي:

$$U_T = W(H - H') - F.E. \quad 3.1$$

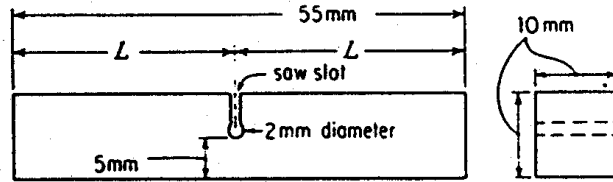
حيث $F.E.$ الطاقة المفقودة نتيجة الاحتكاك ويمكن إهمالها نتيجة صغر قيمتها، وتستخدم العينات المحزوزة في كل من اختباري تشاربي وأيزود لتحديد مكان الكسر وتسهيل الكسر في حالة المواد المطيلة نتيجة وجود تركز للإجهادات عند قاع الحز يضاعف مقاومتها للصدم، وقد تستخدم عينات غير محزوزة في حالة اختبار عينات من الحديد الزهر.

أشكال العينات القياسية:

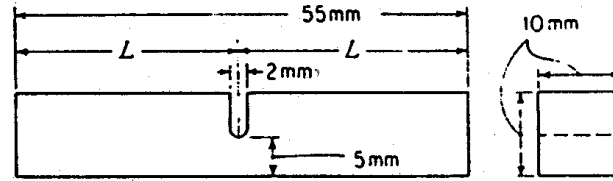
لكل من اختبار أيزود وتشاربي شكل للعينة يختلف من حيث شكل الحز ففي اختبار أيزود للصدم يكون شكل الحز ثابت لكل العينات وهو مجرى بزاوية ٤٥° وعمق ٢ مم أما في حالة تشاربي فيكون الحز بأشكال مختلفة ويكون في وسط العينة كما هو موضح في الشكل ٣,٢.



(a) Specimen with V notch

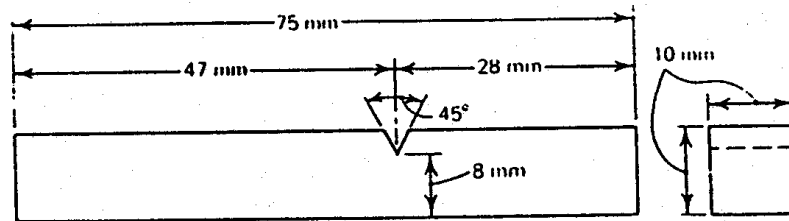


(b) Specimen with keyhole notch



(c) Specimen with U notch

(A)



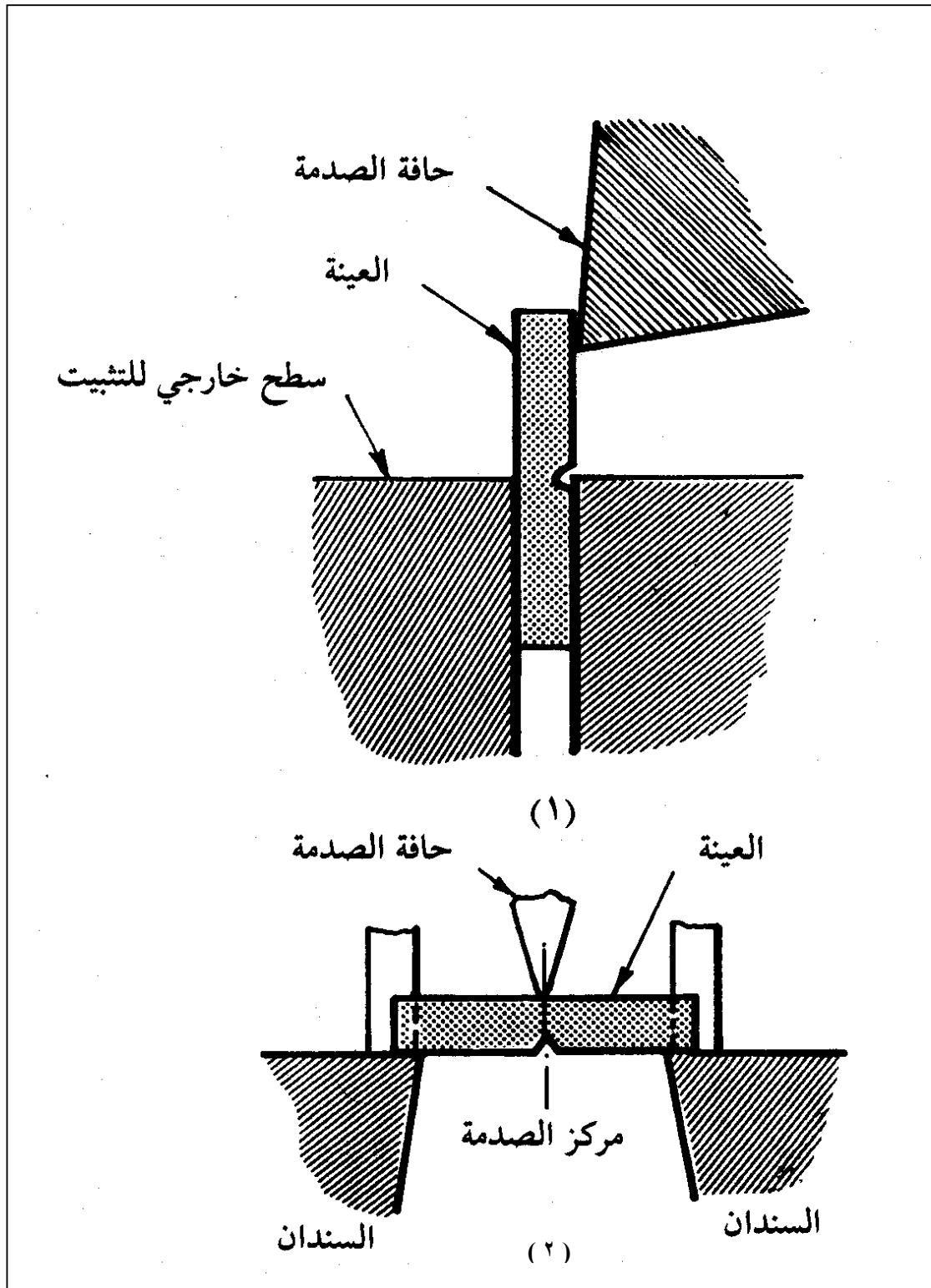
(B)

شكل ٣،٢ A - أشكال عينات صدم قياسية تشاربي

B - شكل عينة صدم قياسية أيزود

طرق تثبيت العينات:

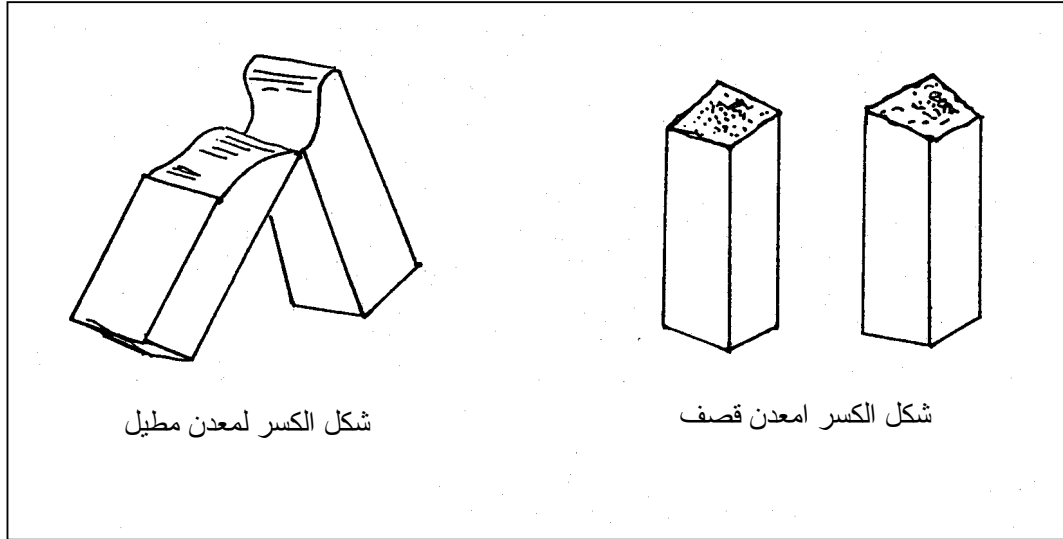
في اختبار تشاربي تثبت العينة أفقياً بحيث تكون الصدمة تؤثر في منتصفها على الوجه المقابل للحز. أما في حالة اختبار أيزود فتثبت العينة رأسياً في ماكينة الاختبار بحيث يكون قاع الحز في مستوى السطح العلوي لكلايات التثبيت وتكون الصدمة على نفس السطح المحتوى للحز.



شكل ٣,٣: طرق تثبيت العينات في اختبار الصدم. ١ - طريقة أيزود ٢ - طريقة تشاربي

شكل الكسر للعينات:

من الملاحظ أن شكل الكسر للعيينة في كل من اختباري تشاربي وأيزود يعكس خاصية ممطولية المعدن أو قساوته فالمعدن المطيل تنثنى عينته مع الكسر أما المعدن القصيف فتكسر عينته عند الحز. كما هو موضح في الشكل ٣,٤.



شكل ٣,٤: أشكال الكسر في اختبار الصدم للمعادن المطيلة والقصيفة



المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

اختبار المواد

اختبار الصلادة

اختبار الصلادة

٤

المحتوى:

اختبار الصلادة وأنواعها

الأهداف:

- ١ - معرفة الغرض من اختبار الصلادة
- ٢ - معرفة اختبار الصلادة بطريقة برنل
- ٣ - معرفة اختبار الصلادة بطريقة فيكرز
- ٤ - معرفة اختبار الصلادة بطريقة ركول
- ٥ - مقارنة الاختبارات الثلاثة ببعض ومعرفة الفروق بينها

الوقت المتوقع للتدريب:

خمسة ساعات

الوسائل المساعدة:

مكائن اختبار الصلادة المختلفة

مقدمة

صلادة أي معدن هي الخاصية التي تمكنه من الاحتفاظ بشكل سطحه سليماً متماسكاً تحت تأثير الأحمال. وقد تعرف الصلادة بأنها قدرة المعدن (سطح المعدن) على مقاومة حدوث علامة به (Indentation) أو مقاومة البري (Abrasion) أي مقاومة التآكل نتيجة الاحتكاك. وهذا التعريف لا يمكن اعتباره عاماً حيث إن بعض المعادن مثل الصلب المنجنيزي له مقاومة قليلة لحدوث العلامة به وفي الوقت نفسه له القدرة على مقاومة البري بدرجة عالية. لذلك لم يتمكن إلى الآن من إيجاد تعريف أساسي يحدد خاصية الصلادة وينطبق على كل المعادن ولكن يمكن إيجاد طرق لمقارنة الصلادة النسبية للمعادن بعضها ببعض. وقد عرفت الصلادة طبقاً لهذه الطرق كما يأتي:

١ - صلادة العلامة: (Indentation Hardness)

وهي خاصية مقاومة المعدن لحدوث علامة به نتيجة تحميله بحمل استاتيكي وديناميكي.

٢ - صلادة الارتداد: (Rebound Hardness)

وهي خاصية قدرة المعدن على الرجوعية أي امتصاص الطاقة وإعادتها ثانية بعد إزالة الأحمال المؤثرة مسببة ارتداداً لها تكبر قيمته كلما كبرت صلادة المعدن.

٣ - صلادة الخدش: (Scratch Hardness)

وهي خاصية مقاومة سطح المعدن للخدش.

٤ - صلادة التآكل: (Wear Hardness)

وهي خاصية مقاومة سطح المعدن للبري أي التآكل نتيجة للاحتكاك.

٥ - صلادة التشغيلية بالمكينات: (Machine ability Hardness)

وهي خاصية مقاومة المعدن للتشغيل بالمكينات مثل عمليات القطع والثقب والقص الخ. .

ويلاحظ أن الطرق سالفة الذكر التي تصف وتعين صلادة المعدن تختلف عن بعضها في معناها وهدفها وبرغم ذلك التباعد إلا أن كل طريقة لها فائدة كبيرة في المقارنة الكمية لصلادة المعادن عند استخدامها في أغراض التشغيل المختلفة فمثلاً صلادة العلامة يتبين أهميتها في مقارنة صلادة ألواح المدرعات الحربية لمقاومة اختراق القذائف وصلادة الارتداد تستخدم في اختبار المعادن ذات الصلادة المناسبة لليابات وصلادة الخدش تفيد في تقدير صلادة المعادن في عمليات البرد وعند تعرض المعدن للخدش أثناء التشغيل أما صلادة البري فتظهر قيمتها في تحديد صلادة المعادن اللازمة لسطوح العجلات الحديدية للقطارات والقضبان الحديدية حتى تكون ذات مقاومة كافية للتآكل نتيجة الاحتكاك وصلادة التشغيلية بالمكينات ذات فائدة قيمة عند تشكيل المعادن بالمخرطة والمثقاب وغيرها.

كما يلاحظ أن مقاييس الصلادة المختلفة المذكورة ترتبط بالقوى الداخلية لجزيئات المعدن الأمر الذي يوضح أن استخدام أية طريقة لمقارنة صلادة المعادن تكون ذات قيمة عملية إذا أجريت فقط على المعادن المتشابهة - فمثلاً - صلادة العلامة ليست بذات معنى ، أو نتيجة إذا عملت المطاط ولكنها أداة فعالة لمقارنة وبيان صلادة أنواع الصلب المختلفة .

مجال اختبار صلادة المعادن

إن اختبار صلادة المعادن له مجال متسع في الصناعة وتنص معظم المواصفات القياسية على ضرورة إجرائه للمعادن وللمنتجات المعدنية كاختبار قبول. وتستخدم نتائج اختبارات الصلادة في الأغراض الآتية:

- ١ - ترتيب المعادن حسب صلابتها حيث إن لكل صلادة معينة استخدام مناسب لها في الصناعة وفي التشغيل.
- ٢ - التحكم في مستوى الإنتاج ومراقبته أثناء التصنيع، وذلك بتعيين صلادة المنتجات فإذا ما اكتشفت قطعة أو أجزاء مخالفة لاشتراطات التشغيل أمكن استبعادها وبذلك نحصل على إنتاج منتظم.. كما أنه إذا اتضح من اختبارات الصلادة أن مجموعة كبيرة من الإنتاج غير مطابقة للصلادة المطلوبة أمكن إيقاف الإنتاج مؤقتاً للبحث عن السبب وملافاة فيتحسن الإنتاج وتقل الخسائر.
- ٣ - ضبط نسبة الكربون المطلوبة للصلب أثناء الصناعة - حيث إن لكل نسبة كربون معامل صلادة معين - بإجراء اختبار الصلادة السريع والسهل يمكن التزود بالبيانات اللازمة.
- ٤ - بيان مدى تأثير طريقة تشغيل المعدن للشكل المطلوب على صلابته وذلك باختبار صلابته قبل وبعد التشغيل لمعرفة تأثير عمليات الدلفنة على البارد أو الساخن أو عمليات السحب البارد .. الخ .
- ٥ - دراسة تأثير عمليات المعاملة الحرارية والتأكيد من صحة إجراءات وتغييرها صلادة المعدن طبقاً لذلك حيث إن عمليات التخمير (Annealing) والتسقية (Quenching) والمراجعة (Tempering) والتصليد بالتغليف (Case-hardening) وتخفيض نسبة الكربون (decarburation) لها تأثير مباشر على صلادة سطوح المعادن.
- ٦ - معرفة الخواص الميكانيكية للمعادن المتعلقة بخاصية الصلادة فمثلاً صلادة العلامة تتناسب طردياً مع مقاومة الشد وتوجد معادلة تحدد هذا التناسب وبذلك يمكننا باختبار الصلادة تعيين مقاومة الشد دون اللجوء إلى إجراء اختبار الشد وهو اختبار متلف (Destructive test) وتنطبق تلك النتيجة على أجزاء المكونات أو العينات التي يراد معرفة مقاومتها للشد ولا يمكن تجهيز

عينات شد منها لتعذر ذلك نتيجة صغر الجزء موضوع الاختبار أو للرغبة في عدم كسر أو إتلاف ذلك الجزء الأمر الذي يجعل اختبار الصلادة عبارة عن اختبار غير متلف للمنتجات المعدنية، وسوف نحصر حديثنا في هذه الوحدة على صلادة العلامة.

صلادة العلامة

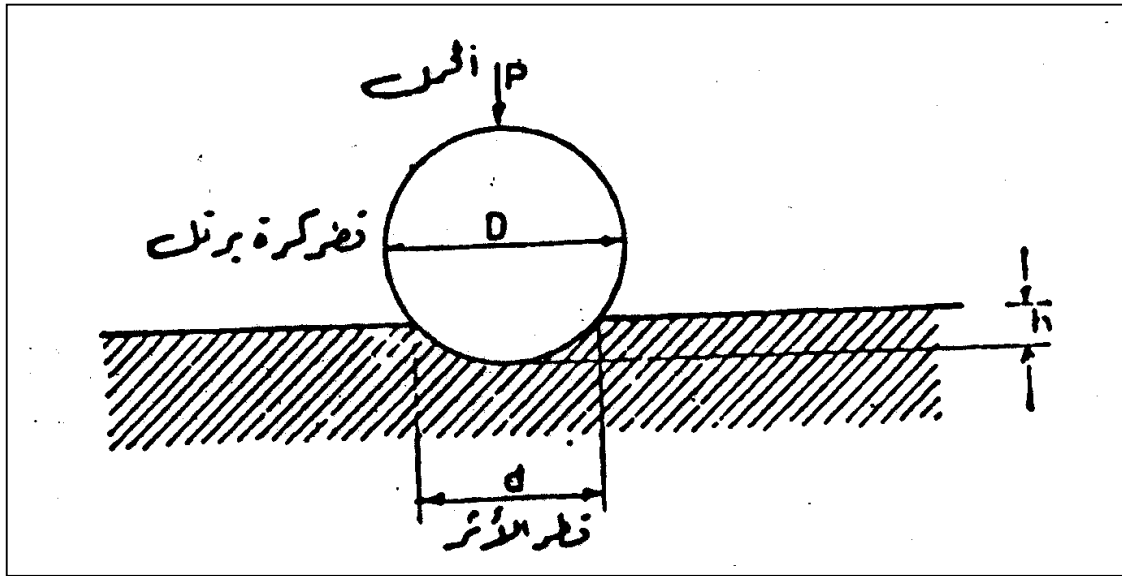
تحدد صلادة المعادن بهذه الطريقة بواسطة عمل علامة بها بالضغط على سطحها بجسم يترك أثراً بعد إزالة الضغط الذي يؤثر به في مدة بسيطة تتراوح من ١٥ إلى ٣٠ ثانية وتقارن صلادة المعادن بقياس عرض الأثر أو عمقه فكلما زادت قيمته كلما كان المعدن أقل صلادة وبالعكس. ويمكن أيضاً تعيين رقم صلادة للمعدن بحساب الإجهاد الحادث من تحميل الضغط والذي يساوي حمل الضغط مقسوماً على مساحة الأثر على المعدن المختبر.

و الجسم الذي يؤثر به في المعادن المختبر قد يكون كرة صغيرة من الصلب ويسمى ذلك الاختبار في هذه الحالة باختبار برنل Brinell أما إذا كان الجسم هرمًا ماسيًا دقيقًا فيسمى باختبار فيكرز Vickers وفي حالة اختبار ركول Reckwell يكون الجسم عبارة عن كرة دقيقة من الصلب أو مخروط له حرف مستدير دقيق من الألماس Brale .

١) اختبار صلادة المعادن بطريقة برنل Brinell

طريقة الاختبار

تتلخص هذه الطريقة في ضغط كرة من الصلب قطرها (D) مم بحمل قدره (P) كجم ثم قياس الأثر (d) مم الناتج من هذا الضغط على سطح قطعة الاختبار وذلك بعد إزالة الحمل المؤثر كما هو مبين بالشكل رقم ٤,١ .



شكل ٤.١: اختبار برنل للصلادة

ويعبر عن صلادة المعدن المختبر برقم برنل للصلادة (B.H.N.) الذي يحسب كما يلي:

رقم برنل للصلادة = حمل الاختبار (كجم) / مساحة أثر الكرة على قطعة الاختبار (مم^٢)

$$\text{Brinell Hardness Number} = \frac{P}{\pi D h} \quad 4.1$$

$$B.H.N. = \frac{P}{\pi D \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} \right)} \quad 4.2$$

$$= \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad 4.3$$

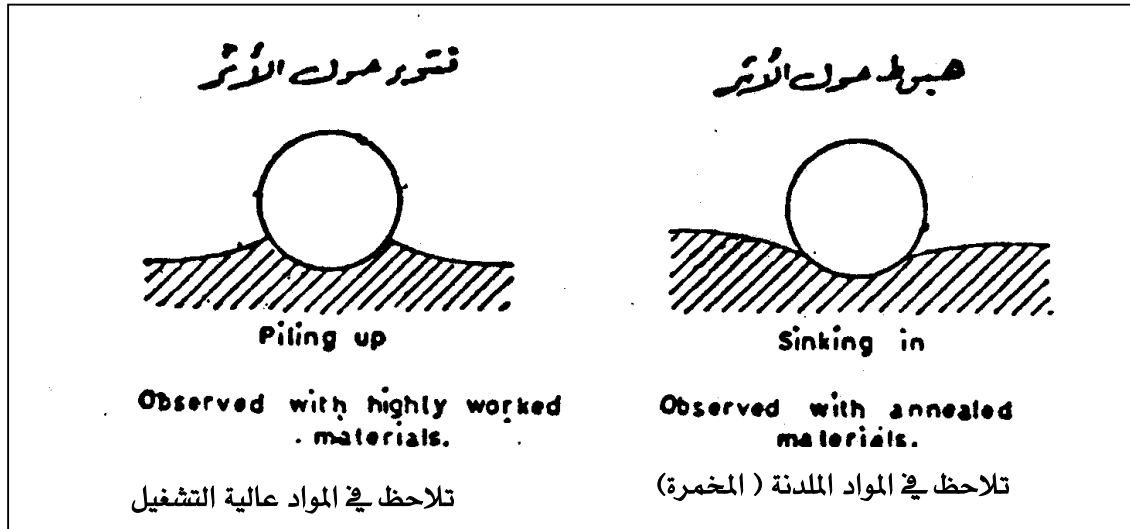
حيث أن: D قطر برنل بالمليمتر

d قطر الأثر بالمليمتر

P حمل الاختبار بالكيلوجرام

ويراعى قياس قطر الأثر (d) في اتجاهين متعامدين واعتبار متوسطهما عند حساب رقم برنل للصلادة، كما يراعى أيضا أن يكون القياس دقيقا حتى ٠,٠١ مم وأن يكون الأثر بشكل وعمق يمكن من دقة القياس أي لا يكون قليل العمق بدرجة تكون هبوط حول الأثر أو لا يكون كبير العمق بدرجة تكون

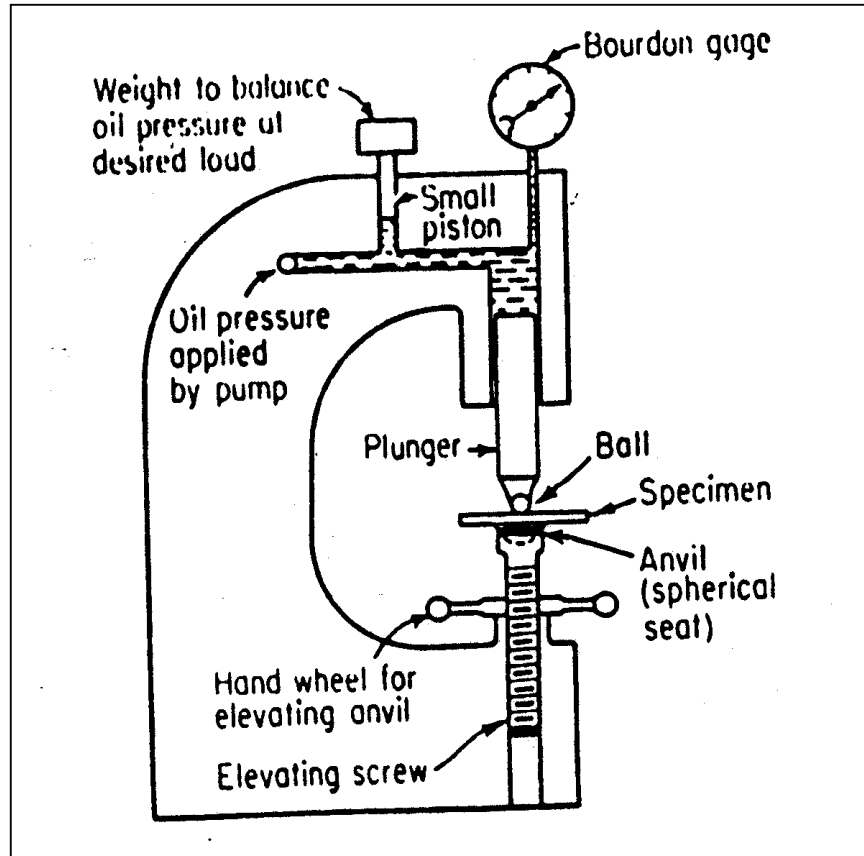
نتوء حول الأثر كما يتبين من الشكل رقم ٤,٢ ويعتبر الأثر مناسباً لحساب رقم برنل إذا كانت قيمة قطره تتراوح من 0.25 إلى ٠,٥ قطر الكرة
أي أن $d/D = 0.5-0.25$ أي متوسط $d/D = 0.375$



شكل ٤,٢ : تأثير شكل وعمق الأثر في اختبار الصلادة بطريقة برنل على دقة القياس

جهاز الاختبار

يمكن استخدام أي نوع مناسب من ماكينات اختبار الضغط أو ماكينات الاختبار العامة تركيب في أحد وجهي الضغط وصلة خاصة بها الكرة الصلب للضغط بها على قطعة الاختبار بحمل معين على ألا تزيد أصغر قراءة لتدرجات حمل المكنة على ٠.٥٪ من حمل الاختبار وأن تكون دقة مكنة الاختبار في حدود = ٠.٥٪ من حمل الاختبار . ثم يقاس قطر الأثر باستخدام ميكرومتر مجهري كما يمكن استخدام مكينات خاصة لاختبار برنل للصلادة شكل (٤,٣) تقوم بعمل الأثر المطلوب وبيانه مكبر على شاشة صغيرة بالجهاز بها ميكرومتر يمكن من قياس قطر الأثر بدقة وسهولة ، كما توجد مكينات لاختبار برنل تعين رقم برنل مباشرة على قرص مدرج أو على مقياس متصل بها الأمر الذي يبسط تحديد صلادة برنل مع السرعة بتوفير عملية الحساب .



شكل ٤,٣: أجزاء ماكينة برنل الهيدروليكية

كرات برنل

تصنع كرات برنل من الصلب الصلب ويجب أن يكون سطح الكرات أملساً وخالياً من العيوب. والكرات المستعملة في هذا الاختبار تكون بأحد الأقطار الاعتبارية المبينة بالجدول رقم ٤,١.

جدول رقم (٤,١): الأقطار الاعتبارية لكرات برنل

١	٢	٥	١٠	قطر الكرة الاعتباري (مم)
٠,٠٠٢٥±	٠,٠٠٣٥±	٠,٠٠٤٠±	٠,٠٠٤٥±	حدود السماح (مم)

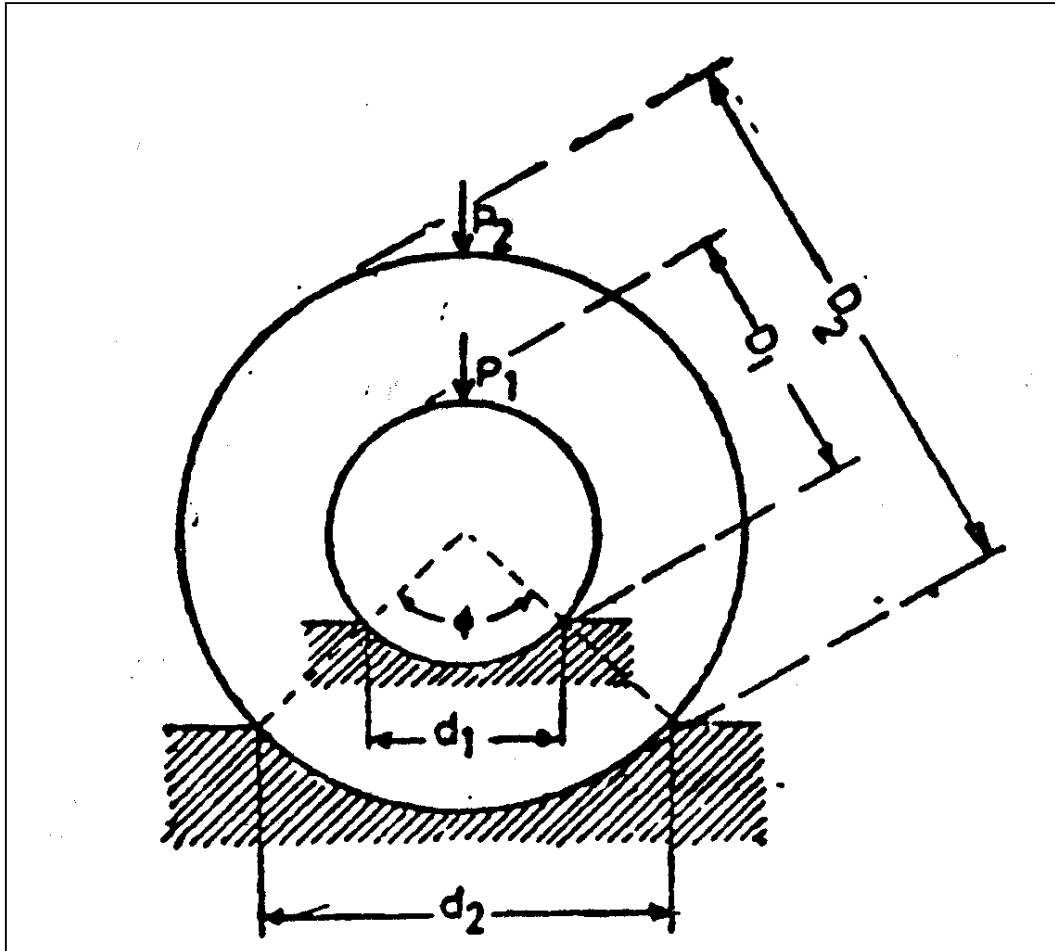
كما يجوز استخدام كرة قطرها ٣,٥ مم بحدود سماح ٠,٠٠٣٥ ويراعى بعد إجراء اختبار برنل التأكد من عدم حدوث عيوب سطحية بالكرة أو تغير في قطرها قيمته أكثر من الحدود المسموح بها وإلا تلغى نتيجة الاختبار وتعتبر الكرة غير صالحة.

ويتوقف اختبار قطر الكرة المناسب للاختبار على أبعاد وسمك عينة الاختبار، وعلى حالة جزيئات سطح المعدن المختبر، وكلما صغرت أبعاد العينة أو قل سمكها كلما استلزم الأمر ضرورة استعمال كرة صغيرة، كما أنه كلما كبرت جزيئات سطح المعدن مثل الحديد الزهر كلما استلزم الأمر ضرورة استعمال كرات كبيرة ١٠ مم أو ٥ مم على الأقل وذلك حتى يقع تحت الكرة ويقاوم تأثير التحميل عدد مناسب من جزيئات السطح حتى تمثل مقاومتها في مجموعها صلادة السطح الصحيحة بدلاً من استعمال كرة صغيرة يعبر أثرها عن صلادة جزء أو جزيئات قليلة للمعدن قد لا تمثل تماماً حالة السطح وذلك لعدم انتظام التركيب الجزيئي تماماً للمعادن.

العلاقة بين قطر كرة برنل وحمل الاختبار

يراعى أن حمل الاختبار المناسب للمعدن المختبر لابد وأن تستعمل معه كرة ذات قطر مناسب حتى نحصل على أثر مناسب لقياس قطره بدقة أي حتى نستوفي الشرط $d/D = 0.5-0.25$ و تساوي عدد ثابت وذلك مهما اختلف نوع المعدن المختبر.

ويتطلب هذا الشرط أن يكون الأثر متشابهاً هندسياً (*Geometrically similar*) مهما اختلفت أقطار كرات برنلي والأحمال المستخدمة، كما يتبين من الشكل (٤,٤).



شكل ٤,٤: حالات التشابه في الأثر (اختبار برنل للصلادة)

وقد تبين من التجارب المختلفة أن متوسط إجهاد الضغط للتحميل على سطح المعدن عدد ثابت عند الحصول على آثار كرات برنل بحيث تتشابه تلك الآثار هندسياً مع اختلاف أقطارها والحمل المؤثر أي أن:

$$\text{إجهاد الضغط} = f = \frac{P}{\pi d^2 / 4} = \text{عدد ثابت للمعدن الواحد} \quad \text{٤,٤}$$

حيث أن: d قطر الأثر بالمليمتر

P حمل الاختبار بالكيلوجرام

يتبين مما سبق أن $\frac{d}{D}$ ثابت و $\frac{P}{d^2}$ ثابت

وعلى ذلك تكون العلاقة بين قطر كرة برنل وحمل الاختبار هي:

$$\text{عدد ثابت} = \frac{P}{D^2}$$

٤,٥

ويختلف هذا العدد الثابت باختلاف نوع المعدن، وتتوقف قيمته على متوسط صلادة المعدن . وقد عينت بالتجارب قيمته بحيث تستوفي الشرط : أن يكون $\frac{d}{D}$ محصوراً بين ٠,٢٥ و ٠,٥ عند اختبار كل معدن. ويبين الجدول رقم (٤,٢) قيمة هذا العدد الثابت والمعادن التي يستخدم لها عند تحديد الحمل وقطر الكرة المناظر له لإجراء الاختبار الصحيح للصلادة .

جدول رقم (٤,٢) : قيمة الثابت (الحمل على مربع قطر كرة برنل) للمعدن المختبر

الرقم برنل للصلادة	أمثلة من المعادن	الثابت
أكبر من ١٦٠	المعادن الحديدية	٣٠
١٦٠ إلى ٦٠	سبائك النحاس وسبائك الألمنيوم	١٠
٦٠ إلى ٢٠	النحاس - الألمنيوم	
أقل من ٢٠	الرصاص - القصدير وسبائكهما	١

الأعمال المستعملة لاختبار برنل للصلادة

إذا أريد اختبار صلادة معدن معين وتم اختيار كرة برنل مناسبة (ذات قطر معين D) فيمكن حساب قيمة الحمل المستعمل في الاختبار من المعادلة $\text{عدد ثابت} = \frac{P}{D^2}$ بمعلومية نوع المعدن الذي يحدد قيمة الثابت على أساسه من الجدول رقم (٤,٢).

فمثلاً إذا كان المعدن من الصلب وكرة برنل قطر ١٠ مم فيكون الحمل اللازم للاختبار = ٣٠٠٠ كجم كالآتي:

$$\frac{P}{D^2} = 30$$

$$\frac{P}{(10)^2} = 30$$

$$\therefore P = 3000 \text{ kg}$$

ويبين الجدول رقم (٤,٣) الأحمال المستعملة في اختبار برنل للمعادن المختلفة.

جدول رقم (٤,٣) الأحمال المستعملة في اختبار برنل

الحمل P كجم				قطر كرة برنل D مم
الثابت P/D ²				
٣٠	١٠	٥	١	
٣٠	١٠	٥	١	١
١٢٠	٤٠	٢٠	٤	٢
٧٥٠	٢٥٠	١٢٥	٢٥	٥
٣٠٠٠	١٠٠٠	٥٠٠	١٠٠	١٠

قطعة الاختبار

يجب ألا يقل سمك قطعة الاختبار عن عشرة أمثال عمق الأثر والذي يحسب من المعادلة :

$$h = \frac{P}{\pi D(B.H.N.)} \quad ٤,٦$$

حيث إن: h عمق الأثر بالمليمتر

P الحمل بالكيلوجرام

D قطر كرة برنل بالمليمتر

B.H.N. رقم صلادة برنل

ويجب ألا يظهر أي انبعاج للسطح الخلفي من قطعة الاختبار ، ناتج من تأثير ضغط الحمل على الوجه المقابل لسطح قطعة الاختبار ، بعد إجراء الاختبار .

سطح قطعة الاختبار

يجب أن يكون سطح قطعة الاختبار مصقولاً بدلاجة تسمح بقياس قطر أثر كرة برنل بمقياس دقته ٠,٠١ مم ويكون ذلك بالبرد أو التجليخ وذلك في حالة استعمال كرة برنل ذات قطر ١٠ مم أو ٥ مم . أما في حالة استعمال الكرة ذات قطر ٢ مم فيكون الصقل باستعمال ورق صنفرة (٣ أصفار) ويراعى أن يكون سطح قطعة الاختبار بعد صقله خالياً من الشوائب مثل القشور والزيوت أو الشحم. كما يجب مراعاة ألا تؤثر طريقة تجهيز سطح قطعة الاختبار على صلادة المعدن المختبر.

موضع أثر كرة برنل

يجب ألا تقل المسافة بين مركز أثر كرة برنل وأقرب حافة لقطعة الاختبار عن مرتين ونصف مرة من قطر الأثر، وكذلك ألا تقل المسافة بين مركزي أثرين متجاورين عن أربع مرات قطر الأثر.

إجراء الاختبار

يجرى اختبار برنل للصلادة في درجة الحرارة العادية ويكون ذلك بوضع قطعة الاختبار على مرتكز صلب ثابت حتى لا تحدث إزاحة أثناء إجراء الاختبار ثم توضع كرة برنل المناسبة على سطح قطعة الاختبار ويضغط عليها بحمل عمودي على سطح قطعة الاختبار ويزاد هذا الحمل تدريجياً حتى تصل قيمته إلى الحمل المناسب للمعدن المختبر المقابل لكرة برنل المستعملة، ثم يترك هذا الحمل مؤثراً على قطعة الاختبار فترة لا تقل عن ١٥ ثانية وبعد ذلك يزال الحمل ويقاس قطر الأثر ويحسب رقم برنل للصلادة.

ويحسن عند ذكر رقم برنل للصلادة بيان قطر الكرة وقيمة الحمل المستخدم في الاختبار مثل ص.ب. (٣٠٠٠/١٠) أي رقم صلادة برنل معين باستخدام كرة قطرها ١٠ مم وحمل قيمته ٣٠٠٠ كما يحسن إجراء أكثر من اختبار على القطعة الواحدة وأخذ متوسط النتائج وذلك كلما سمحت مساحة قطعة الاختبار بذلك.

حدود استخدام طريقة برنل للصلادة

يعتبر استخدام طريقة برنل لاختبار صلادة المعادن غير صحيح في الأحوال الآتية:

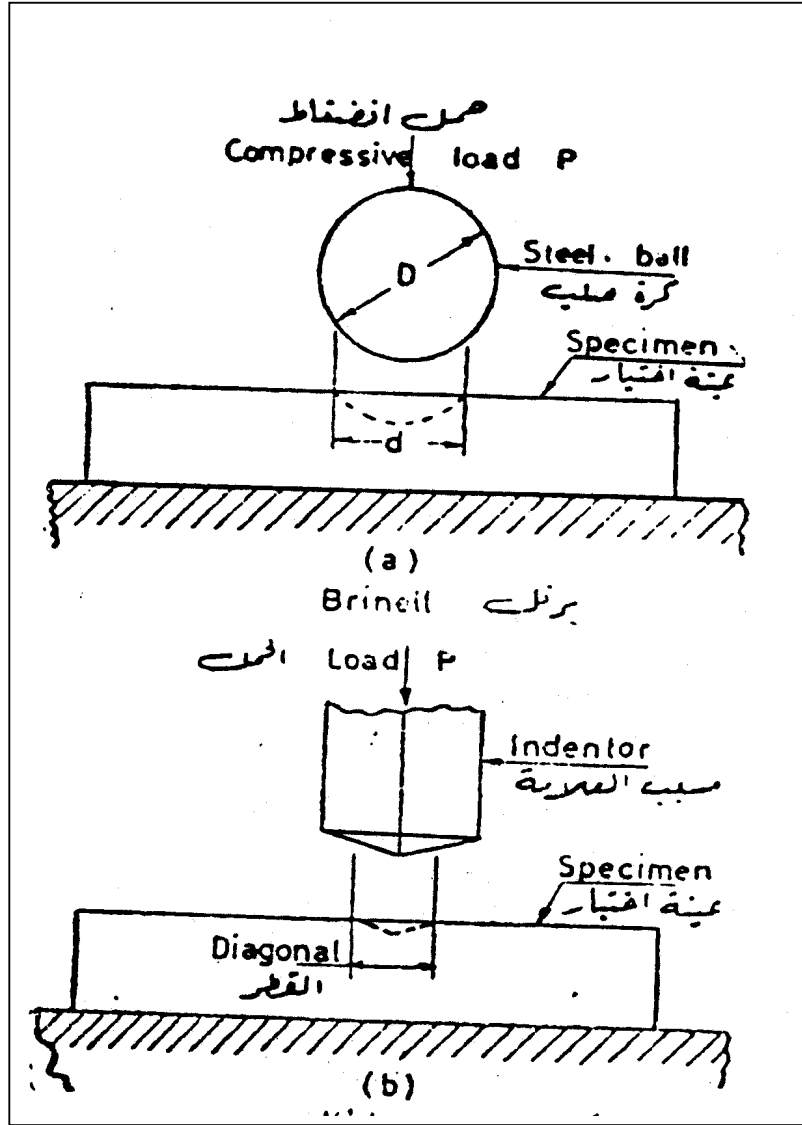
- إذا كان المعدن المختبر شديد الصلادة حيث يخشى على كرة برنل من أن تغير شكلها فبذلك لا تحدث علامة حقيقية تمثل صلادة المعدن المختبر.
- إذا كانت العينة المختبرة رقيقة جداً أي ذات سمك صغير حيث تحدث كرة برنل بسطح المعدن انبعاجاً يظهر أثره من الجانب الآخر وتكون نسبة عمق الأثر إلى سمك العينة لا تتفق مع ما سبق تحديده وبذلك لا يعبر رقم برنل في هذه الحالة عن صلادة المعدن الحقيقية.
- إذا كانت العينة المختبرة مصلدة بالتغليف حيث ينتظر أن يكون أثر كرة برنل له عمق أكبر من سمك الجزء المصلد وحينئذ لا يمثل رقم برنل صلادة الغلاف المصلد لسطح العينة وهو غرض الاختبار.

ب) اختبار صلادة المعادن بطريقة فيكرز *Vickers*

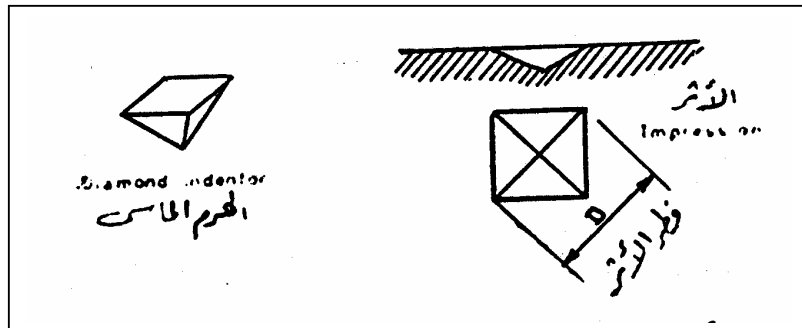
طريقة الاختبار

يجرى هذا الاختبار بنفس طريقة اختبار برنل شكل رقم (٤,٥) ولكن الجسم المؤثر بالحمل المحدث للأثر ليس كرة مصلدة من الصلب ولكن عبارة عن هرم من الماس مربع القاعدة وتتقاطع مستوياته عند الحروف بزاوية قدرها 136° ويعين بعد التحميل - في هذه الحالة أكبر مقاس للأثر أي قطر الأثر ويحسب رقم فيكرز للصلادة كآتي:

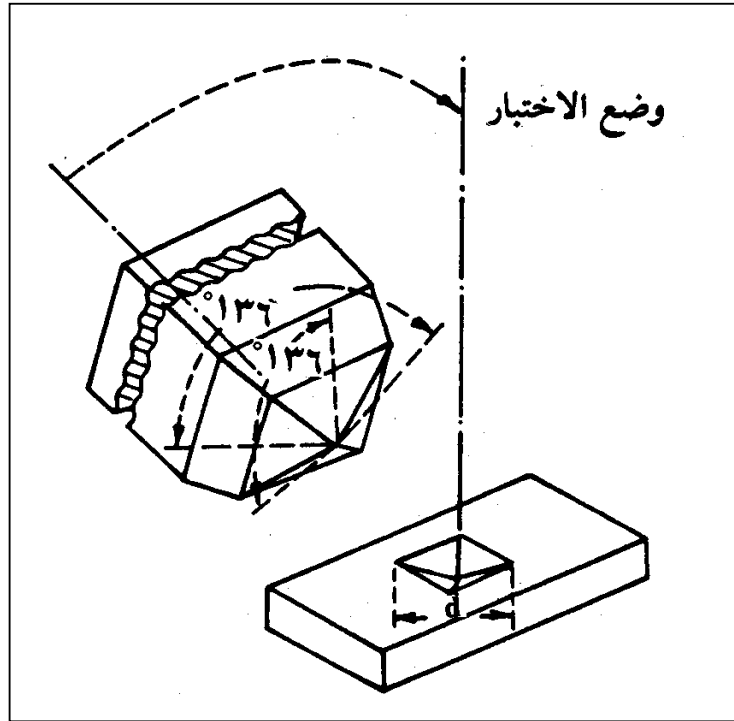
$$\text{Vickers hardness number} = \frac{2.P.\sin(\theta/2)}{D^2} = 1.854 \frac{P}{D^2} \quad ٤,٧$$



شكل ٤,٥: صلادة العلامة بجهاز اختبار برنل وفيكرز



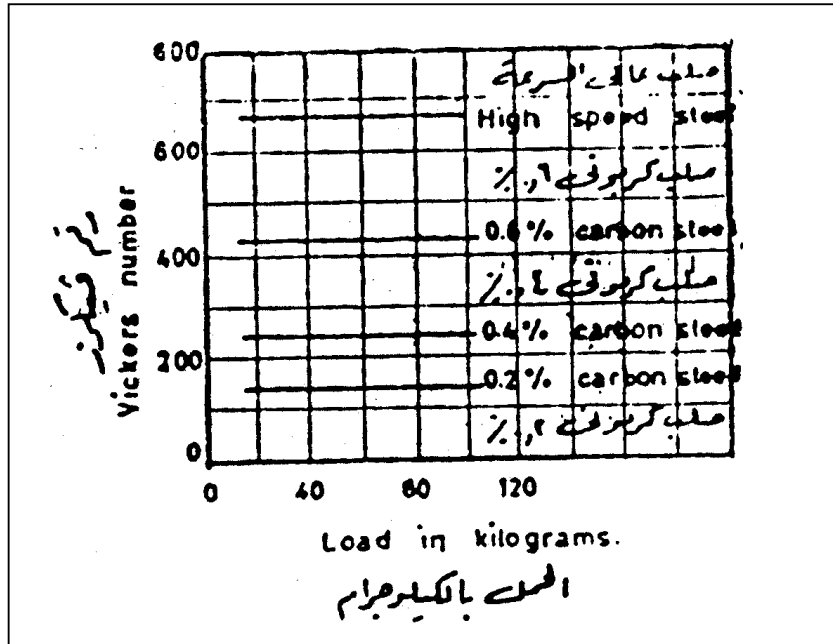
شكل ٤,٦: أثر المكبر الماسي لاختبار فيكرز



شكل ٤,٧: الزاوية بين أسطح رأس الهرم في اختبار فيكرز = ١٣٦°

جهاز الاختبار

يكون إجراء اختبار الصلادة للمعادن بطريقة فيكرز بجهاز خاص يقوم بتحميل قطعة الاختبار بأحد الأحمال ١٠٠ أو ٥٠ أو ٣٠ أو ٢٠ أو ١٠ أو ٥ كجم وحسب اختيار القائم بالاختبار طبقاً لحالة صلادة المعدن المختبر وسمك وأبعاد قطعة الاختبار وعمق الأثر المسموح به بالجزء المختبر تفادياً لاتلاف سطحه. ويلاحظ أن اختلاف التحميل مع ثبوت الهرم الماسي في كل حالة لا يؤثر في اختلاف قيمة رقم فيكرز للصلادة حيث ثبت من التجارب المتعددة أن رقم فيكرز ثابت للمعدن الواحد مهما اختلفت الأحمال المؤثرة كما يتضح من الشكل (٤,٨) .



شكل ٤,٨: اختلاف التحميل مع ثبات الهرم الماسي في اختبار صلادة

فيكرز لا يؤثر على قيمة الصلادة

ويقوم هذا الجهاز بعمل الأثر الذي يمكن قياس قطره بميكرومتر عن طريق ميكروسكوب، أو أن هذا الأثر يظهر مكبراً على شاشة الجهاز حيث يمكن قياس قطر الأثر بدقة، أو أن الجهاز يعطي مباشرة عن طريق مقياس خاص قيمة رقم فيكرز للصلادة.

ويلاحظ أن الهرم الماسي المؤثر بالحمل على العينة أكثر صلادة من كرة برنل لذلك ليس له ظاهرة التغير في الشكل مهما كبرت صلادة المعدن المختبر أو مهما تغيرت الأحمال المؤثرة. كما أن الهرم الماسي دقيق وأصغر مقاساً من كرات برنل الأمر الذي يعطي أثراً دقيقاً. كما أنه نظراً لحروف الهرم الحادة فإن أثره يظهر واضحاً محدداً وبذلك يكون قياس قطر الأثر مضبوطاً ودقيقاً أكثر من حالة أثر برنل.

مزايا اختبار صلادة المعادن بطريقة فيكرز

يمكن باختبار فيكرز للصلادة الحصول على قيمة دقيقة لرقم الصلادة وتعبير تام عن صلادة المعدن المختبر وذلك مع استخدام جهاز صغير الحجم وأحمال مؤثرة صغيرة، كما يمكن لهذا الاختبار باستخدام الهرم الماسي الدقيق تحديد صلادة المعادن شديدة الصلادة وقليلة الصلادة والمعادن الرقيقة السمك التي لا يصلح لها اختبار برنل وذلك حتى سمك قدره ٠,١٠ مم.

لذلك يستعمل هذا الاختبار في الأعمال التي تتطلب نتائج دقيقة للمعادن مهما اختلف النوع أو تنوعت الأبعاد أو اختلفت الصلادة، ويعتبر اختباراً هاماً في أعمال المقارنة والأبحاث.

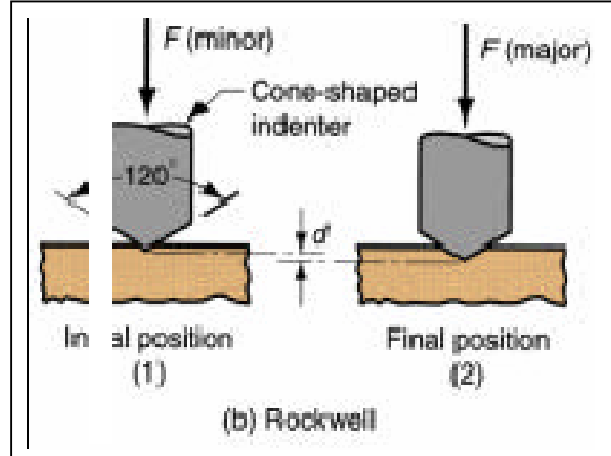
ج) اختبار صلادة المعادن بطريقة ركول *Rockwell*

إجراء الاختبار

يجرى اختبار ركول باستخدام مكنة خاصة تؤثر بحمل ٦٠ أو ١٠٠ أو ١٥٠ كيلوجرام وهو حمل صغير بالنسبة للحمل المستعمل في طريقة برنل.

كما أن الجسم المحدث للأثر عبارة عن كرة صغيرة من الصلب المصلد ١٦/١ بوصة أي ١,٥٨٨٨ مم أو مخروط له حرف مستدير من الماس يسمى (Brake).

ويجرى الاختبار بتحميل قطعة الاختبار بحمل ابتدائي قيمته ١٠ كجم (Minor load) وبعد ذلك يعاد مؤشر القرص المدرج للجهاز أمام التدرج . ثم يزداد الحمل بإضافة الحمل الكبير (Major load) حتى يكون الحمل الكلي النهائي ٦٠ أو ١٠٠ أو ١٥٠ كجم حسب نوع اختبار ركول المستخدم (الحمل النهائي = الحمل الابتدائي + الحمل الكبير المضاف) كما في الشكل ٤,٩



شكل ٤,٩ : طريقة ركول لقياس الصلادة

ويلاحظ أنه أثناء التحميل بالحمل الكبير المضاف يسير الجسم المحدث للأثر داخل سطح قطعة الاختبار وفي نفس الوقت يتحرك مؤشر القرص المدرج للجهاز لأنه متصل بالجسم المحدث للأثر بحيث أنه كلما زاد عمق الأثر كلما زادت حركة دوران المؤشر على قرص الجهاز. ثم يزال الحمل الكبير المضاف فيقل عمق الأثر قليلاً ويرتد بالتبعية قليلاً المؤشر على القرص ويثبت عند تدرج معين يكون رقمه هو رقم ركول للصلادة (مع ملاحظة أن الحمل الابتدائي ١٠ كجم لا زال مؤثراً على قطعة الاختبار أي أن رقم الصلادة يتعلق بالأثر الناتج من الحمل الكبير فقط).

وقد بنى ركول طريقته على أساس أن رقم ركول المبين على تدريج الجهاز يتناسب تناسباً عكسياً مع عمق الأثر الناتج من الحمل الكبير أي أنه كلما زاد عمق الأثر كلما صغر رقم ركول للصلادة أي كلما قلت صلادة المعدن المختبر.

مقاييس ركول للصلادة

رقم ركول هو رقم اعتباري حدده ركول على تدريج قرص جهازه على الأساس السابق ذكره. وهناك مقاييس مختلفة لتحديد الصلادة بطريقة ركول: مقياس ركول B ومقياس ركول C ومقياس ركول A ويختار المقياس المناسب تبعاً لصلادة المعدن المختبر كما هو مبين بالجدول (٤,٤)، كما أنه عند الاختبار لتحديد الصلادة على أساس هذا المقياس يستخدم حمل نهائي معين وجسم محدث للأثر معين أيضاً كما هو موضح بالجدول رقم (٤,٤).

ويقسم القرص المدرج لكل مقياس إلى ١٠٠ قسم يمثل كل قسم منها عمق أثر قيمته ٠,٠٠٢ فمثلاً مقياس ركول B يبدأ من رقم ٣٠ (كصفر للبداية) وينتهي برقم ١٣٠ ومقياس ركول C يبدأ من رقم صفر وينتهي برقم ١٠٠ ويكون رقم ركول للصلادة كالآتي:

$$\text{رقم ركول } B = 130 - \text{عمق الأثر (مم)} / 0,002$$

$$\text{رقم ركول } C = 100 - \text{عمق الأثر (مم)} / 0,002$$

ويلاحظ أن مقياس ركول C يستخدم للمعادن التي صلابتها أكبر من رقم ركول $B = 100$ أما مقياس ركول A فيستخدم للحالات الخاصة.

جدول رقم (٤,٤) مقياس ركول للصلادة

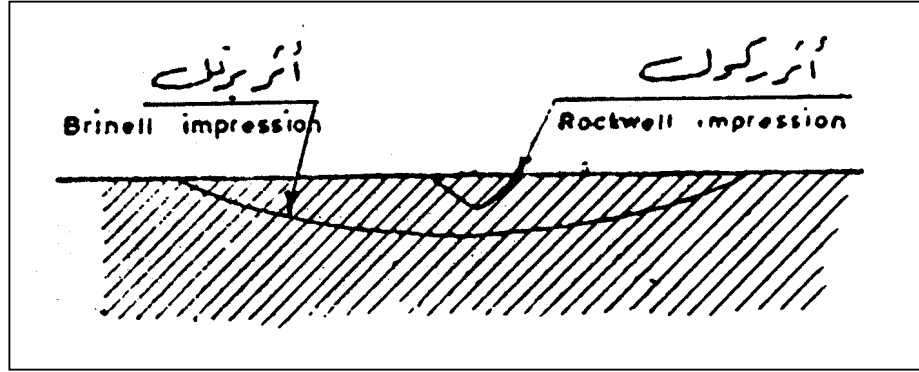
مقياس ركول	الجسم المحدث للأثر	الحمل الكلي للأثر كجم	المعادن التي يحدد صلابتها المقياس
ركول B	كرة صلب مصلدة قطر ١,٥٨٨ مم	١٠٠	الصلب الكربوني الطري والمتوسط والألواح والقضبان المعدنية الطرية
ركول C	مخروط بحرف ماسي مستدير Brale	١٥٠	الصلب المصلد والسبائك الحديدية والسبائك المعدنية ذات صلادة أكثر من ركول ١٠٠
A	مخروط بحرف ماسي مستدير Brale	٦٠	شرائح الصلب المصلد الرقيقة والمعادن والسبائك شديدة الصلادة وفي اختبار الصلادة إذا أريد أن يكون الأثر الحادث صغيراً

قطعة الاختبار

يراعى تجهيز سطح قطعة الاختبار قبل إجراء الاختبار كما هو الحال في اختبار برنل يجعل السطح مستوياً وناعماً وخالياً من الخدوش والعلامات أو أن يكون ملتصقاً به زيوت أو شحوم أو أية مواد غريبة كما يراعى عدم حدوث انبعاج بالجانب الآخر للعينة بعد الاختبار.

مزايا طريقة ركول للصلادة

تستخدم طريقة ركول بكثرة في الصناعة لصغر الجهاز الخاص بها وإمكان اختبار صلادة المعادن المختلفة الصلادة سواء صغيرة أو كبيرة الصلادة والحصول على رقم الصلادة مباشرة من قراءة تدريج قرص الجهاز مما يوفر عملية الحساب، ويمكن من ليست لهم خبرة بتعيين رقم ركول للصلادة بتشغيل الجهاز وقراءة رقم الصلادة من تدريجات القرص. كما أن الأثر الناتج من طريقة ركول صغير جداً إذا قورن بالأثر الناتج من طريقة برنل كما يتبين من الشكل (٤,١٠)



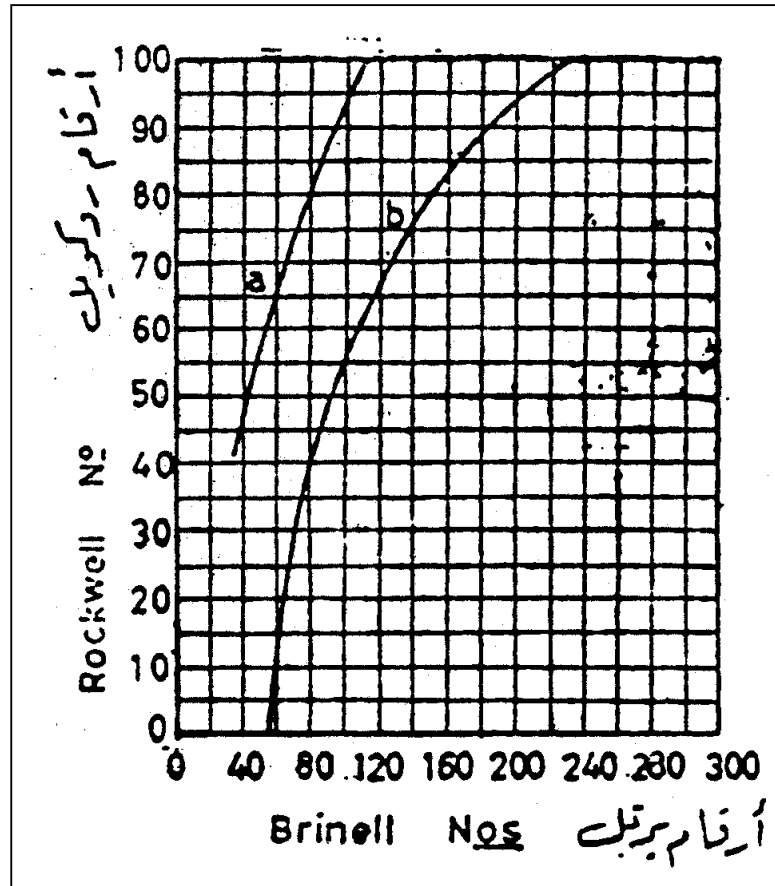
شكل ٤,١٠: أثر برنل وأثر روكول في اختبار الصلادة

العلاقة بين أرقام الصلادة بالطرق المختلفة

اتضح من التجارب المتنوعة أنه لا توجد علاقة ثابتة صحيحة تماماً بين أرقام الصلادة المعينة بالطرق المختلفة خصوصاً أن هذه العلاقة قد تتأثر بالمعاملة الحرارية أو بالتشغيل على البارد أو في درجات الحرارة المختلفة وتختلف قيمتها من معدن إلى آخر، لكن توجد علاقة تقريبية في درجة الحرارة العادية للمعادن المتشابهة مثال ذلك ما هو مبين بالأشكال (٤,١١ ، ٤,١٢) ومن الجدول رقم (٤,٥).

جدول رقم (٤,٥): أرقام الصلادة بالطرق المختلفة

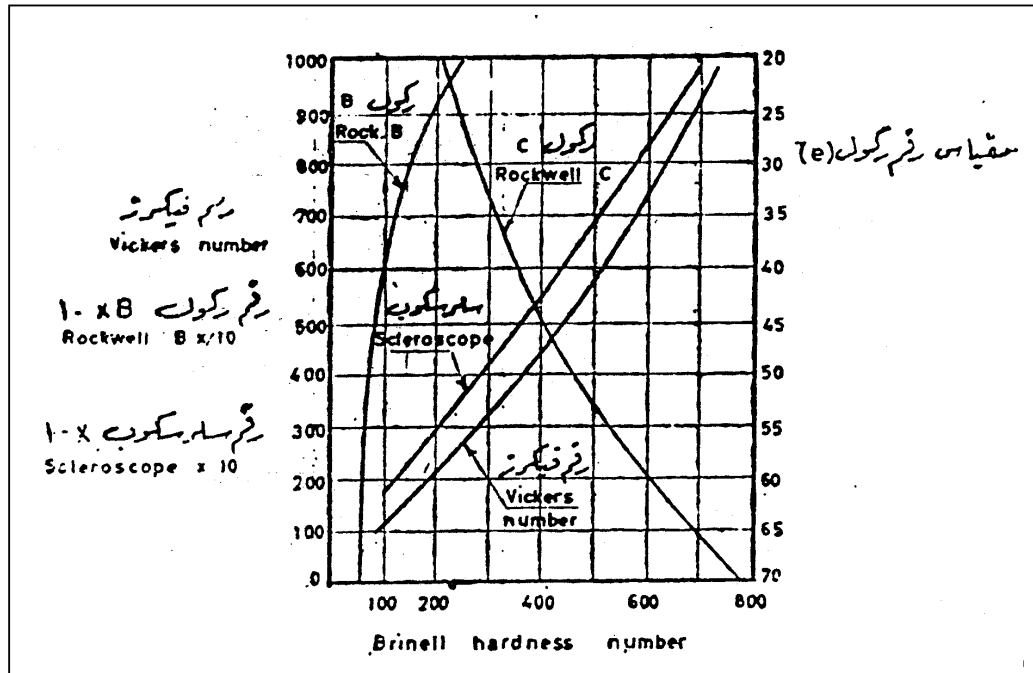
رقم ركول للصلادة	رقم صلادة فيكرز	رقم برنل بحمل ٣٠٠٠ كجم وكرة قطر ١٠ مم	
		رقم صلادة	قطر الأثر
٥٥	٦٣٣	٤٥٥	٢,٦٠
٥٠	٥٤٠	٤٩٥	,
٤٤	٤٣٧	٤١٥	٣,٠٠
٣٧	٣٦٣	٣٥٢	٣,٢٥
٣٢	٣٠٥	٣٠٢	٣,٥٠
٢٦	٢٦٣	٢٦٢	٣,٧٥
٢١	٢٢٩	٢٢٩	٤,٠٠
١٥	٢٠٢	٢٠٢	٤,٢٥
٨	١٧٩	١٧٩	٤,٥٠
٢	١٥٩	١٥٩	٤,٧٥
-	١٤٣	١٤٣	٥,٠٠
-	١١٦	١١٦	٥,٥٠
-	٩٥	٩٥	٦,٠٠



شكل ٤,١١: تحويل أرقام روكول إلى ما يناظرها من أرقام برنل

a- مقياس روكول B كرة ١٦/١ بوصة وحمل ٦٠ كجم

b - مقياس روكول B كرة ١٦/١ بوصة وحمل ١٠٠ كجم



شكل ١٢،٤: العلاقة بين أرقام الصلادة المختلفة

ويتبين من ذلك أنه لقبول أو رفض المعادن طبقاً لاشتراطات التعاقد على رقم صلادة معين للمعادن أو المنتجات يلزم إجراء اختبار الصلادة الذي يحدد هذا الرقم فقط ولا يعتبر صحيحاً أن يترتب القبول أو الرفض على رقم صلادة لم تحصل عليه بالاختبار المباشر وإنما بإجراء اختبار رقم صلادة آخر ثم ترجمة النتيجة بالجدول أو الأشكال البيانية التقريبية إلى رقم الصلادة المتعاقد عليه.

العلاقة بين رقم برنل للصلادة وبين مقاومة الشد للمعادن

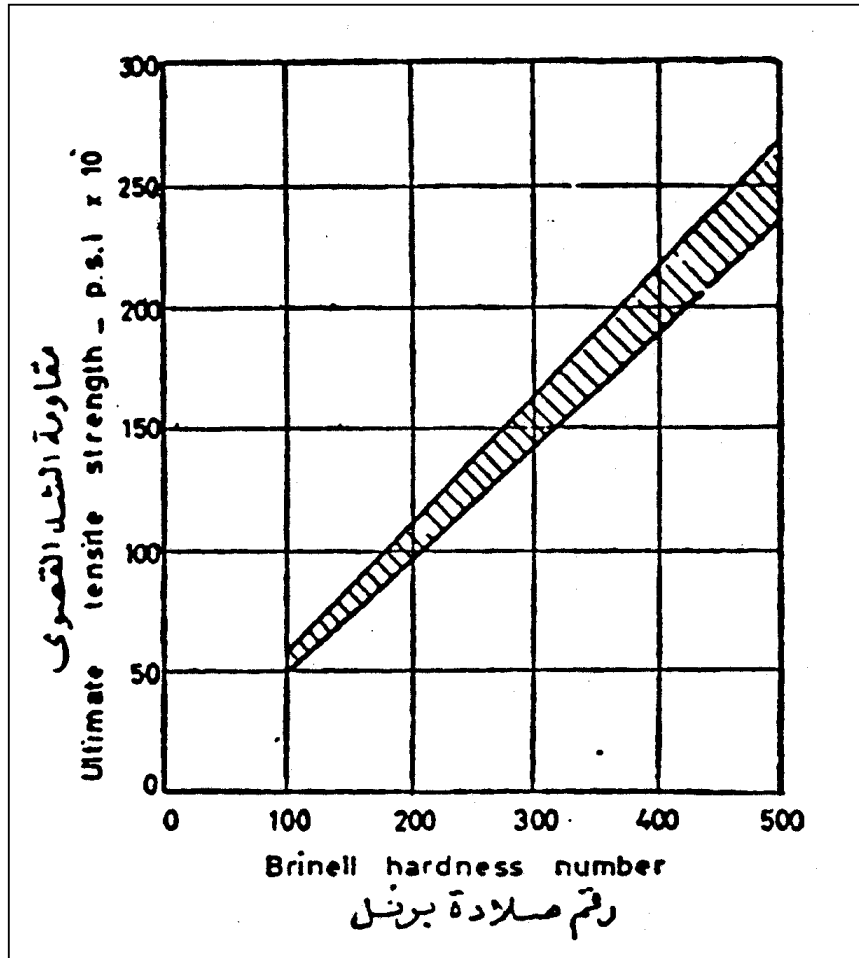
أثبتت التجارب أنه لا توجد علاقة ثابتة بين رقم برنل لصلادة المعادن وبين مقاومة تحملها في الشد كما يتضح من الجدول رقم (٤،٦).

جدول رقم (٤,٦) العلاقة بين مقاومة الشد ورقم برنل للصلادة للمعادن المختلفة.

المعدن	صلب ٠,٤ % كربون	سبيكة ألومنيوم	صلب	نحاس أصفر مصبوب	ألومنيوم مسحوب
مقاومة الشد كجم/مم ^٢	٧٠	٤٥	٤٨	٢٠	٠,٩٣.
رقم برنل	١٩٤	١١٤	١٣٥	٥٣	٣١
مقاومة الشد رقم برنل	٠,٣٦١	٠,٣٩٥	٠,٣٥٥	٠,٣٧٨	٠,٣

لذلك لا يمكن اتخاذ رقم الصلادة أساساً صحيحاً لحساب مقاومة الشد للمعادن المختلفة واستخدام تلك المقاومة للشد في حسابات التصميمات الهندسية.

ولكن اتضح من التجارب أنه للمعادن المتشابهة (مثلاً المعادن الحديدية) أمكن إيجاد علاقة تقريبية بين رقم برنل للصلادة والمقاومة للشد شكل (٤,١٣) وتفيد غالباً إذا أريد معرفة مقاومة أجزاء المكونات بدون تلفها (أي بدون إجراء اختبار الشد وهو اختبار متلف) أو إذا أريد معرفة المقاومة للشد لأجزاء المكونات، والمنشآت التي لا يمكن لصغرها تحضير قطعة اختبار شد منها أو إذا أريد معرفة مقاومة الشد لأجزاء المكونات والمنشآت الناتجة من انهيارها لتعليل سبب الانهيار وعدم التمكن لصغر وتنوع شكل تلك الأجزاء من إجراء اختبار الشد .



شكل 4.13: العلاقة بين الصلادة ومقاومة الشد القصوى
لمجموعة مختلفة من الصلب الكربوني وسبائك



المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

اختبار المواد

اختبارات غير متلفة

اختبارات غير متلفة

٥

المحتوى:

الاختبارات غير الإتلافية وبعض طرقها

الأهداف:

- ١ - معرفة الغرض من الاختبارات غير الإتلافية
- ٢ - معرفة بعض طرق الاختبارات غير الإتلافية مثل أشعة إكس - التردد فوق الصوتي - المجال المغناطيسي
- ٣ - معرفة كيفية الكشف عن العيوب الداخلية للمعادن

الوقت المتوقع للتدريب:

ست ساعات

الوسائل المساعدة:

بعض أجهزة الاختبارات غير الإتلافية

مقدمة

إن استخدام الظواهر الطبيعية في تقييم وتفتيش أو توصيف المواد دون إتلافها والمحافظة على خصائصها، قد تطور في التقنية المعروفة باسم اختبار المواد غير المتلفة، والهدف الأساسي من هذه الاختبارات هو المساعدة في ضمان أن المواد الأساسية والمنتجات النصف مصنعة أو المنتجات النهائية تؤدي الوظائف المطلوبة منها .

ولكي يتمكن القائم بالعمل في الاختبارات غير المتلفة من تنفيذ هذا الهدف الكبير، يجب أن يختار الطريقة المناسبة لاختبار كل منتج وكذا المعدات التي تصلح لكل عملية. كما يجب أن يكون العامل على مستوى مناسب من التدريب لتأدية الاختبار المطلوب واستخراج النتائج بالطريقة المناسبة، ويجب أن يتوفر في العامل في اختبارات المواد غير المتلفة ما يلي:

١. الإلمام بالمواد وخواصها، وتأثير عمليات التصنيع، والمعالجات الميتالورجية، وتشطيب الأسطح على هذه الخواص .

٢. الإلمام بعلاقات الخواص الميكانيكية وأسلوب ارتباطها بالخواص الطبيعية للمواد.

٣. الإلمام بميكانيكية الانهيار وطرقه، وكيف ولماذا تنهار المادة.

٤. أن يفهم المبادئ الأساسية للطرق الفنية المختلفة لاختبارات المواد غير المتلفة ومعرفة طرق تحليل النتائج، ويقدر مزايا وعيوب وحدود استخدام كل طريقة من هذه الطرق .

فائدة الاختبارات غير المتلفة

لقد ساعدت اختبارات المواد غير المتلفة على تطوير جودة المنتجات وطرق التصنيع وتحليل نسبة المرفوض من المواد التالفة ، وبالتالي ساعدت في توفير الوقت والمال لكل من المنتج والصانع والمستخدم لهذه المنتجات والمواد ، وقد ساعدت هذه الاختبارات أيضاً في وضع المعلومات والبيانات الخاصة بالانهيار وميكانيكيته الذي ساعد بالتالي في تجنب تكرار الانهيار .

ونظراً لصعوبة المشاكل الواجب حلها بالاختبارات غير المتلفة، فيلزم إنشاء مجموعة عمل متكاملة من فيزيائي المواد وأخصائي الميتالورجيا، والمهندس الكهربائي والكيميائي والمهندس الميكانيكي، لأن مثل هذه المجموعة من الفنيين يمكنها التكامل باستفادة أحدهم من خبرات الآخرين للوصول إلى أحسن المستويات المفيدة والمنفذة للاختبارات غير المتلفة، وعلى هذا فإن تقنية الاختبارات غير المتلفة هي تقنية متعددة الأنظمة تتضمن الكثير من النواحي المختلفة والمتكاملة للوصول للهدف.

ولا تتضمن الاختبارات غير المتلفة اكتشاف الشروخ (**Crack Hunting**) فقط ولكن الأكثر فائدة هو دراسة أنواع الخلل الموجودة في المادة، وهذه الدراسة تساعد بالتالي في تقييم حالة المادة عند الاستخدام، ويمكن أن تلعب هذه الاختبارات دوراً هاماً في عدد من النواحي منها:

- ١ - دراسة الخلل في المادة والتعرف عليه.
- ٢ - تطوير أساليب العمل والتفتيش والمراقبة على الإنتاج.
- ٣ - قياس الخواص الفيزيائية والكيميائية والميتالورجية، أو التغير في هذه الخواص.
- ٤ - قياس السمك والأبعاد.

وبجانب أنواع الخلل الكبيرة في المادة مثل الشوائب والشواغر والشروخ توجد أنواع من الخلل المجهرى (**Micro Flows**) في بنية المادة نفسها، مثل حجم الحبيبات واتجاهاتها، والتكوين الكيماوي للمادة، والإجهادات الداخلية، والتغيرات نتيجة التشكيل على البارد والمعالجة الحرارية وغيرها، وكل ذلك صعب القياس ويحتاج إلى طرق تقنية دقيقة، كما أن الخلل المجهرى قد يكون ذا تأثير على خواص المادة واستخدامها أكثر منه في حالة الخلل الكبير (**Macro Flows**). فعلى سبيل المثال يتم توصيف عمليات المعالجة الحرارية للوصول إلى خواص ميكانيكية مطلوبة أو مرغوبة ويمكن أن يكون الجزء مقبولاً شكلياً حتى إذا لم نحصل على شكل الحبيبات المطلوب، ولكن الجزء لن يؤدي المتطلبات المفروضة ميكانيكياً، وكذلك يؤثر اتجاه ترتيب الحبيبات على الخواص الميكانيكية للمادة بشكل واضح، كما تعتبر الإجهادات الداخلية من العيوب ذات التأثير الضار على طريقة أداء الجزء الميكانيكي وتتشأ الإجهادات الداخلية غالباً من تأثير المعاملات الحرارية **Heat treatment** والتشكيل على البارد **Cold working**.

ومن الصعوبة تعميم عملية أو مجموعة من عمليات الاختبارات غير المتلفة على الأنواع المختلفة من المنتجات والمواد. وذلك لأن العيوب تختلف من منتج إلى آخر بطرق متفاوتة وبأسلوب آخر يمكن القول بأنها يجب أن تتوافق طريقة الاختبار مع المشكلة أو العيب المتوقع مثل خصائص المادة من حيث الشكل والحجم وطريقة التصنيع وتشطيب السطح، ومع أن المعلومات تكون في معظم الأحوال غير مباشرة، إلا أن الاختبارات غير المتلفة تجرى طبقاً لدراسات تطبيقية سابقة تتعلق بطرق الإنتاج والأساليب المستخدمة فيه. وفي الفترة الأخيرة تطورت أساليب التفتيش والاختبار كنتيجة إيجابية لمتطلبات زيادة جودة الإنتاج، ونتيجة للتغير السريع في طرق الإنتاج وأيضاً لاستخدامها في خدمة عمليات الأمان للإنسان والممتلكات، وقد أصبح الاختبار عملاً هندسياً حقيقياً يتطلب استخدام الأجهزة والمعدات العلمية من الأنواع المختلفة، وهو

يتضمن الكثير من الأساليب بدءاً من طرق اختيار العينات واختبارها بالفحص البصري إلى أعلى أساليب وطرق التحليل المستخدمة في أساليب الاختبارات غير المتلفة.

إن الاختبارات غير المتلفة هي خليط من الخبرة والعلم، ولكن أحد الصعوبات التي تقابل العامل بهذا الاختبار أن معظم النتائج التي يتم الحصول عليها هي نتيجة لعمليات غير مباشرة أي أن النتائج تظهر في كل اختبار بطريقة تتعلق بطريقة الاختبار وتحليل نتائجه، وهي تحتاج إلى تدريب ومهارة لاستنتاج القرارات المناسبة التي تتناسب مع نتائج الاختبار، وفي الواقع فإن عمليات الاختبار بسيطة ولكن الخبرة والتدريب عاملين هامين جداً لتقرير النتائج.

ومن أنواع الاختبارات غير المتلفة ما يلي:

- | | |
|-------------------------|------------------------------------|
| Visual Inspection | ١ - الاختبار بالفحص البصري |
| Penetrant Inspection | ٢ - اختبار مخترق السوائل |
| Leak Test | ٣ - اختبار التسرب |
| Thermal Test | ٤ - الاختبار بالطرق الحرارية |
| Magnetic Particale Test | ٥ - الاختبار بالدقائق المغناطيسية |
| Radiography | ٦ - الاختبارات بالأشعة |
| Ultrasonic Test | ٧ - الاختبار بالترددات فوق الصوتية |
| Eddy current Test | ٨ - الاختبار بالتيارات الدوامية |
| Microwave Test | ٩ - الاختبار بالموجات القصيرة جداً |
- كما تعتبر بعض طرق اختبار الصلادة من الاختبارات غير المتلفة للمواد.

أنواع العيوب Type of defects

يمكن تقسيم العيوب التي تقوم الاختبارات غير المتلفة باكتشافها إلى المجموعات الآتية:

- | | |
|--|------------------|
| Inherent Defects | ١ - عيوب متأصلة |
| وهي الناشئة عن عمليات الإنتاج الأولى للمادة الخام. | |
| Processing defects | ٢ - عيوب التصنيع |
| وهي الناتجة أثناء عمليات تصنيع المادة لإنتاج جزء الماكينة أو المنشأ. | |
| Service defects | ٣ - عيوب التشغيل |
| وهي التي تظهر أثناء دورات تشغيل الجزء من الماكينة أو المنشأ. | |
| وهذه العيوب يمكن أن تتخذ أحد الأشكال الآتية: | |

١- الشروخ **Cracks** السطحية وما تحت السطحية .

٢ - المسامية **Porosity**

٣ - التمزق **Tears**

٤ - ضعف (نقص) الترابط **Lack of bond**

٥ - الشوائب الداخلية **Inclusions**

٦ - الانعزال **Segregation** ويقصد به انفصال بعض العناصر الكيماوية للسبيكة أثناء تجمدها من الحالة السائلة .

٧ - قلة التغلغل في اللحام **Lack of penetration in welding**

٨ - الفجوات الأنبوبية وتنتج داخل الجسم المتجمد من الحالة السائلة.

٩ - عيوب الكلل أو التعب **Fatigue Defects**

١٠ - فجوات غازية **Blow Holes** وهي عبارة عن فجوات يحبس في داخلها غاز أثناء تجمد المعدن .

١١ - القشور الداخلية في المواد الحديدية **Flakes** .

١٢ - النقر **pitting**

١٣ - التراكب **Laps**

الاختبار بالفحص البصري Visual Inspection

يعتبر الاختبار بالفحص البصري من أكثر الاختبارات غير المتلفة شيوعاً لسهولة وسرعة إجرائه ورخص تكلفته، ويلزم الأمر فحص العينات فحصاً بصرياً جيداً حتى لو تقرر إجراء فحوص أخرى عليها، فمثلاً إذا فحص شخص له خبرة عالية لحاماً فإن بإمكانه الحصول على المعلومات التالية :

- وجود أو عدم وجود الشروخ السطحية، واتجاه ومكان الشروخ إن وجدت.

- المسامية السطحية **surface porosity**

- نقر غير ممتلئ **unfilled crater**

- مقدار تغلغل اللحام ووجود الشوائب الناتجة من قشور الأكسيد القريبة من السطح.

- وجود عيوب ميكانيكية أخرى مثل الشرخ الحاد **sharp notch**

ولإجراء الفحص البصري تنظف العينة جيداً قبل اختبارها بواسطة عمليات السفع بالرمل **sand**

blasting أو السفع بالقذف **shot blasting** أو غيرها - حيث إن الصدا السطحي يحجب العيوب، ثم

تضاء العينة المختبرة جيداً، وبعد ذلك تفحص العينة بالعين المجردة أو بمساعدة أحد الأجهزة الحساسة للإضاءة مثل خلايا الضوء **photocells** ، أو أنابيب الضوء **phototubes** ، فإذا فحصت عينة بالعين مباشرة فإن تكبيرها يعتمد على الصورة الشبكية للعين .

وإذا وضعت عدسة مجمعة **converging lens** أمام العين فسوف تزداد زاوية الرؤية ، وترى العين صورة مكبرة للجسم ، وتعتمد إمكانية رؤية العيوب على درجة الإضاءة ، ودرجة التباين **contrast** بين العينة والخلفية **Background** .

اختبار المخترق والمظهر الضوئي والمخترق الفلوري

Luminex penetrant & developer and fluorescent testing methods

تعتبر الاختبارات بالمخترق والمظهر الضوئي امتداداً لطرق الاختبار البصري حيث إن الهدف منها هو إظهار العيوب السطحية الموجودة في العينة ، وفي الإمكان استخدام هذه الطريقة لكل المعادن وكذلك للسيراميك والبلاستيك غير المسامية.

وتتميز هذه الطريقة بسهولة وسرعتها والاعتماد عليها ورخص تكلفتها ويعيبها أنها لا تستطيع أن تظهر سوى الشروخ السطحية أو الممتدة من السطح. ويمكن باستخدام هذه الطريقة معرفة شروخ اللحام والتجليخ والتعب والانكماش والصب ، والفجوات الغازية والثقوب والمسامية وعدم الالتصاق في اللحامات وعيوب أدوات التشكيل والقوالب ، إذا كانت هذه العيوب مفتوحة إلى السطح الخارجي للمنتج.

تجهيز العينات

يجب أن يكون سطح العينة نظيفاً تماماً قبل بدء الاختبار بخلوه من الأوساخ والشحوم والطلاء والصدأ ، أو أي مواد قد تغلق الشروخ.

ويتم تنظيف السطح بسائل تنظيف أو بضغط البخار ، أو إزالة الشحوم بالبخار **vapor degreasing** أو التتميش بالحامض **Acid etching** .

ويجب عدم استخدام طريقة السفع بالرمل **sand blasting** في تنظيف الأسطح حتى لا تغلق الشروخ بالرمل .

طرق الاختبار

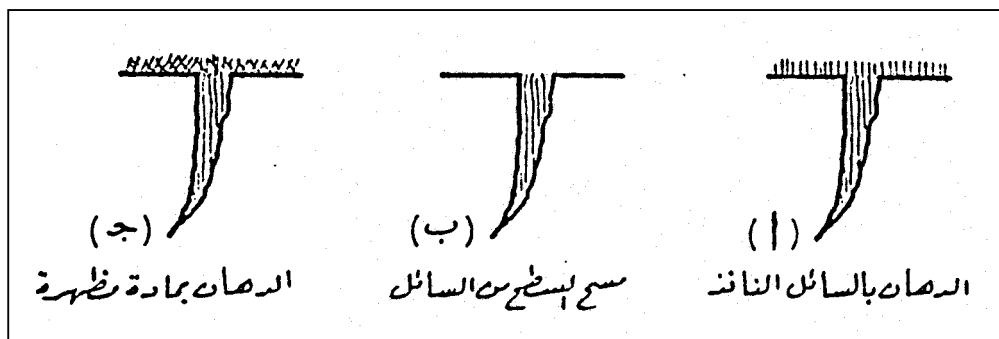
تعتمد الفكرة الأساسية للاختبارات بالمخترق على دهان السطح بسائل معين ثم تنظيف السطح ، فيخرج السائل من الشروخ بعد التنظيف إلى السطح بواسطة الخاصية الشعرية **Capillaries** ، وبإظهار هذا

السائل (بطرق تختلف باختلاف طريقة الاختبار) تظهر أماكن الشروخ، ولهذا يصعب معرفة الشروخ العريضة نسبياً بهذه الطريقة حيث لا يتبقى بها أي سائل بعد تنظيفها. ومن أهم الطرق المستخدمة في اختبار المخترق هي:

- ١ - طريقة الزيت والبياض oil and whiting method
- ٢ - طريقة الصبغة dye method
- ٣ - طريقة المظهر الفلوري fluorescent method
- ٤ - طريقة المواد المخترقة المشعة radio-active method

طريقة الزيت والبياض oil and whiting method

في هذه الطريقة يدهن سطح العينة بزيت مخترق مثل الكيروسين، ثم يترك لمدة كافية ليملأ الزيت العيوب الممتدة من السطح، ثم ينظف السطح جيداً أو يجفف، ثم يدهن السطح مرة أخرى بالبياض (كربونات الكالسيوم) إما جافة أو مخلوطة بالكحول، وبعد فترة يخرج السائل من الشروخ إلى البياض ويبقعه، فيكون مكان البقع هو مكان الشروخ.



شكل ٦،١: اختبار المخترق

وبعد جفاف البياض تدار العينة ويطرق عليها بخفة ليساعد الطرق الزيت على الخروج من الشروخ، وقد يستخدم الزيت الساخن لقلّة شدة السطحي وانخفاض لزوجته، هذا بالإضافة إلى أن التسخين يعمل على تمدد الشروخ قليلاً فيكبرها ويساعد على اختراق الزيت لها.

طريقة الصبغة dye method

وتتم عملية الاختبار في هذه الحالة كما يلي:

- ١ - يدهن "المخترق" وهو عبارة عن صبغة لونية مذابة في سائل على سطح العينة، وقد تتم هذه العملية بغمس العينة في المخترق أو رشها به.
- ٢ - بعد مرور فترة يزال المخترق من على سطح العينة، بعد أن يكون قد تغلغل في الشروخ، وذلك بإزالته بنوع من المزيل اللوني أو بغسله بالماء أو منظف خاص.
- ٣ - تزال نتائج عملية التنظيف باستخدام قطعة من القطن أو القماش.
- ٤ - تدهن العينة أو ترش بالمبين (المظهر) الذي يكون على هيئة سائل أو رش أو على هيئة بودرة مثل التلك **talc**.

وبهذا تظهر الشروخ والعيوب الموجودة في العينة عندما يبتل المظهر بمادة المخترق التي تخرج بالخاصية الشعرية كما سبق إيضاحه، وتظهر العيوب في شكل مناطق ملونة.

fluorescent method

طريقة المظهر الفلوري

تستخدم في هذه الطريقة مواد فلورية **Fluorescent** ذائبة في المخترق، وتجري العملية بنفس الأسلوب المتبع في المخترق بالصبغة على أن تتم في حجرة مظلمة، ثم يكشف عن العيوب باستخدام الأشعة فوق البنفسجية **Ultraviolet**، ويلاحظ أن معظم المواد البترولية تحتوي على نسبة من المواد الفلورية، ولذلك تكون المواد المستخدمة لها أساس بترولي، وتظهر العيوب في صورة نقط لامعة. ومن مظاهر التقدم الكبير في مجال المواد المخترقة الفلورية ظهور المادة المسماة زيغلوبنتركس (**Zyglo pentrex**) التي تستعمل معها مادة مظهرة تجعل الاختراق أكثر سرعة ووضوحاً وتعتمد مدة بقاء المخترق على نوع مادة العينة وعلى نوع حجم العيوب، ويبين جدول (6.1) زمن بقاء المخترق في حالة استخدام زيجلو بنتركس في الاختراق.

جدول (6.1) : زمن الاختراق لمخترق زيجلوبنتركس

المادة	زمن الاختراق (دقيقة)
ألومونيوم مصبوب	١٥ - ٥
ألومونيوم مشكل بالكبس	٣٠
ألومنيوم ملحوم	٣٠
مغنسيوم مصبوب	١٥
مغنسيوم مشكل بالكبس	٣٠
مغنسيوم ملحوم	٣٠
صلب غير قابل للصدأ مصبوب	٣٠
صلب غير قابل للصدأ مشكل بالكبس	٦٠
صلب غير قابل للصدأ ملحوم	٦٠
النحاس والبرونز مصبوب	١٠
النحاس والبرونز مشكل بالكبس	٣٠
النحاس والبرونز ملحوم	١٥

طريقة المواد المخترقة المشعة Radio Active Method

في هذا الاختبار تغمر العينة في المادة المشعة ثم تعرض لضغط كاف حتى تتخلل المادة الشروخ ، ثم ينظف سطح العينة من المادة الزائدة ، وتعين أماكن العيوب باستخدام التصوير الفوتوغرافي أو عن طريق كاشف الأشعة .

هذه الطريقة خطيرة نظرا لصعوبة إزالة المواد المشعة من العينة بعد اختبارها لذلك لا تستخدم هذه الطريقة الا في حالات خاصة.

الاحتياطات الواجب توافرها في اختبار المخترق:

يلزم أخذ الاحتياطات التالية عند إجراء اختبار المخترق:

- ١ - بعض المختبرات متطايرة **Volatile** ، وأخرى لها نقطة وميض منخفضة **Low flash point** وقد يكون البخار المنبعث من المخترق خانقاً ، لذا يلزم تهوية جيدة لمكان الاختبار.
- ٢ - قد يكون أساس الزيت المستخدم كمخترق مسبباً لتهيج البشرة ، لذلك يلزم لبس قفازات وغسل الأيدي بعد استعمال المخترق.
- ٣ - يجب عدم استنشاق المبيئات (مواد الإظهار) التي على شكل بودرة.
- ٤ - يجب عدم التعرض للإضاءة الفوق بنفسجية بطريقة مباشرة.
- ٥ - يجب إجراء الاحتياطات الخاصة باستخدام المواد المشعة عند استخدامها مثل ملابس الوقاية المصنوعة من الرصاص.

اختبارات الفحص بالمجال المغناطيسي MAGNAFLUX INSPECTION

تتلخص هذه النظرية في أنه إذا حدث مجال مغناطيسي في قطعة يراد اختبارها ثم رشت ذرات الحديد عليها نجد أن تلك الذرات تتجمع في مناطق الشروخ والشوائب. كما أنه يمكن أيضاً بتقدير المنفذية المغناطيسية ومقارنتها أن تتبين مواضع العيوب ومدى التجانس في الأجزاء المختبرة الأمر الذي يمكن الحكم به على مدى صلاحية تلك الأجزاء للاستعمال.

تقسيم المواد حسب منفذيتها المغناطيسية:

يمكن تقسيم المواد على أساس منفذيتها المغناطيسية:

- أ) مواد بارامغناطيسية **PARAMAGNETIC** كالهواء والألمنيوم .
- ب) مواد دايامغناطيسية **DIAMAGNETIC** كالنحاس .
- ج) مواد حديدية **FERROMAGNETIC** كالحديد والنيكل والكوبالت .

جهاز الاختبار بمقارنة المنفذية المغناطيسية

تتلخص هذه الطريقة في مغنطة العينات المختبرة باستخدام التيار المتغير بأجهزة خاصة وبيان مدى منفذيتها المغناطيسية ومقارنة بعضها مع بعض.

استخداماتها

تستخدم هذه الطريقة في الإنتاج الصناعي لضمان تجانس القطع المنتجة حيث يستدل على عدم التجانس أو وجود العيوب بالاختلاف في المنفذية المغناطيسية التي يمكن بيانها على جهاز الاختبار. حيث تظهر موجات على شاشة الجهاز أو تضاء لمبات كهربائية عند اختبار عينات مختلفة عن العينات السليمة فيمكن استبعادها وبذلك يكون الإنتاج تحت مراقبة دقيقة.

جهاز اختبارات الشروخ بالمجال المغناطيسي

إذا رشت برادة الحديد حول قضيب ممغنط فإنها تتشكل حسب خطوط القوى المغناطيسية في المجال المغناطيسي للقضيب. كما أنها تتجمع بكثرة حول القطب الشمالي والقطب الجنوبي للقضيب فإذا وجد كسر في القضيب أو شرخ فإن كل من جزئي القضيب يعمل كمغناطيس مستقل بذاته له قطب شمالي وقطب جنوبي تسمى بالأقطاب الموضعية فإذا رشت برادة الحديد فإنها تتجمع حول القطبين الشمالي والجنوبي وكذلك القطبين الموضعيين.

ولهذا إذا وجد في جسم ممغنط شرخ تام أو جزئي فإن الأقطاب الموضعية التي تتكون نتيجة لذلك تتسبب في تكون ذرات الحديد حولها الأمر الذي يكشف عن موضع الكسر أو الشرخ.

استخدامات طريقة برادة الحديد:

تستخدم هذه الطريقة في:

- الكشف عن الشروخ الناتجة من الحرارة أو من عمليات التشغيل أو من معاملة المعدن حرارياً.
- الكشف عن الشروخ الناتجة من خلال المعادن ولا سيما في مجال الصدا.
- بيان شروخ اللحام.
- معرفة الفجوات الداخلية والعيوب تحت سطح العينات لا سيما عيوب اللحام الداخلية.

وقد تعطي هذه الطريقة بعض المظاهر الخادعة من تجمعات برادة الحديد يظن منها أنها أماكن تواجد شروخ ولكنها قد تكون في الواقع نتيجة لتراكم البرادة حول فتحة أو حرف صدأ أو لتغير مفاجئ لقطاع العينة المختبرة أو لوجود مجال مغناطيسي خارجي في مكان التجربة أو عند نقطة اتصال

لمعدنين جديدين مختلفين حيث تختلف منفذيتها المغناطيسية لذلك يحسن مراعاة تلك الظواهر ومثيلاتها عند إجراء الاختبار.

ملاحظات هامة

- ١ - للكشف عن الشروخ الطولية تستخدم طريقة المجال الدائري **CIRCULAR FIELD**.
- ٢ - للكشف عن الشروخ العرضية تستخدم طريقة المجال الطولي **LONGITUDINAL FIELD**.

مقدمة

١ اختبار الشد

٢٨ اختبار الضغط

٣٧ اختبار الصدم

٤٤ اختبارات الصلادة

٦٩ اختبارات غير متلفة

محتويات

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS

BAE SYSTEMS